



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI TİPİNİN GEOPOLİMER SİSTEMİN
TAZE HAL ÖZELLİKLERİ VE DAYANIMINA ETKİSİ

Yüksek Lisans Tezi

Hasan Erinc KESER

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

İzmir

2022

T.C.

EGE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI TİPİNİN GEOPOLİMER SİSTEMİN TAZE
HAL ÖZELLİKLERİ VE DAYANIMINA ETKİSİ**

Hasan Erinç KESER

Tez Danışmanı: Prof.Dr. Kambiz RAMYAR

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2022



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Akışkanlaştırıcı katkı tipinin geopolimer sistemin taze hal özellikleri ve dayanımına etkisi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

27/10/2022

Hasan Erinç KESER

ÖZET

Akışkanlaştırıcı Katkı Tipinin Geopolimer Sistemin Taze Hal Özellikleri ve Dayanımına Etkisi

KESER, Hasan Erinç

Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Ekim, 2022, 106 sayfa

Geopolimer uygun alüminosilikat kaynaklarının belirli moleküler oranları sağlayacak şekilde alkali aktivatör ile karıştırılması ve kür edilmesiyle elde edilen inorganik alternatif bir yapı malzemesidir.

Bu çalışmada lignin, polikarboksilat, melamin, naftalin gibi farklı su azaltıcı katkıların uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile üretilen geopolimer harç ve hamurların işlenebilirlik, priz süresi, yüksek sıcaklık direnci ve dayanım özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Karışımların mikro yapısı ve taze hal özellikleri ise SEM/EDS, XRD ve reolojik analizlerle belirlenmiştir.

Uçucu kül grubunda polikarboksilat eter esaslı akışkanlaştırıcıların düşük dozajlarda kullanımı sulu tasarlanan muadil karışımlarına göre daha fazla yayılma verdiği fakat %6-15 oranında basınç dayanımını düşürdüğü tespit edilmiştir.

Cüruf ile elde edilen karışımlarda ise bütün su azaltıcı katkılar su ile hazırlananların yayılma değerlerini geçemediği ve basınç dayanımını uçucu küle benzer seviyede düşürdüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, İşlenebilirlik, Priz süresi



ABSTRACT

Effect of Plasticizer Admixture Type on Fresh State Properties and Strength of Geopolymer Systems

KESER, Hasan Erinc

MSc in Materials Science and Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

October 2022, 106 pages

Geopolymer is an alternative inorganic construction material obtained by mixing suitable aluminosilicate sources with alkali activator in a way to provide certain molecular ratios.

In this study, the effects of different water reducing admixtures such as lignin, polycarboxylate and melamine naphthalene on the workability, setting time, high temperature resistance and strength of geopolymer mortar/paste mixtures produced with fly ash and blast furnace slag were investigated. The microstructure and fresh properties of the mixtures were determined by SEM/EDS, XRD and rheological analysis.

The flow of fly ash-based mortar mixtures was improved slightly upon adding polycarboxylate ether-based admixtures at low dosages, compared to that of the control mixture. However, the compressive strength reduced by 10-15%.

In the mixtures obtained with slag, it was observed that all water reducing admixture-bearing mixtures did not exceed the flow and compressive strength values of the counterpart mixtures prepared with water. The same behavior was observed in the fly ash-bearing geopolymer mixtures.

Keywords: Geopolymer, Fly ash, Blast furnace slag, Workability, Setting time



ÖNSÖZ

Beton dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Ancak çimento üretilirken hem fazla miktarda karbon salımı yapılmakta hem de aşırı miktarda enerji tüketilmektedir. Bir ton çimento üretimi için doğaya yaklaşık olarak bir ton karbondioksit salınmakta olup çimento endüstrisi dünyadaki toplam karbon salınının %6-8'inden sorumludur. Bu sebeple yapı sektöründe de sürdürülebilirlik kavramı önem kazanmış ve çimentoya alternatif arayışları hızlanmıştır. Geopolimer bağlayıcılar da bu alternatiflerden biridir. Geopolimerler yüksek dayanıma, iyi derecede yangın, sülfat, asit ve alkali-silis reaksiyonu direncine sahip ucuz ve çevreci malzemelerdir.

Çimento/beton endüstrisinin yan sektörlerinden birisi de katkı sektörüdür. Kimyasal katkı sektöründe, çimento esaslı yapı malzemesi üretiminde kullanılmak üzere akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, dayanım artırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı gibi çok sayıda katkı üretilmektedir. Beton sektöründe en yaygın kullanılan katkı ise su azaltıcı katkılardır.

Katkıların büyük çoğunluğu çimento ile birlikte kullanılmak üzere üretilmektedir. Geopolimerler ise çimentodan tamamen farklı bir yapı ve sertleşme mekanizmasına sahip olup; genellikle 60-120°C gibi sıcaklıklarda kürlenerek üretilmekte ve çok yüksek pH değerlerine sahip aktivatörlerin kullanılması nedeniyle de taze halde bazik özellikler göstermektedir. Geopolimerlerin en büyük dezavantajlarından birisinin işlenebilirlik problemleri olmasına rağmen, akışkanlaştırıcı katkıların geopolimerlerin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkisi hala tam anlamıyla anlaşılamamıştır. Ayrıca onlarca yılın birikimi ile çimento için üretilen katkıların bu yeni bağlayıcı ile uyumlu olup olmayacağı, hangi tipteki katkıların geopolimerlerde etkinlik göstereceği ciddi bir soru işareti olarak ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışmasında farklı akışkanlaştırıcı katkılar kullanılarak bu soru işaretlerinin giderilmesine yönelik bir araştırma yapılmıştır.

İZMİR

27/10/2022

Hasan Erinç KESER

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL ve ONAY SAYFASI..... **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANIiv

ÖZETvi

ABSTRACT viii

ÖNSÖZx

İÇİNDEKİLER xii

ŞEKİLLER DİZİNİ..... xvii

TABLolar DİZİNİ xxii

1. GİRİŞ.....1

1.1. Tezin AMAÇ ve Kapsamı2

2. GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİ3

2.1 Geopolimerlerin Kısa Tarihçesi3

2.2 Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler4

2.2.1 Uçucu kül.....5

2.2.2 Granüle yüksek fırın cüruf.....6

2.2.3 Alkali aktivatör7

2.3	Geopolimerizasyon	7
2.3.1	Geopolimerizasyon mekanizması ve isimlendirilmesi.....	7
2.3.2	F sınıfı uçucu külün alkali aktivasyonu	12
2.3.3	Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu	13
2.4	Geopolimerizasyona Etkiyen Faktörler	15
3.	BETON TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN KİMYASAL KATKILAR	17
3.1	Katkıların Sınıflandırılması	17
3.2	Su Azaltıcı (akışkanlaştırıcı) Kimyasal Katkılar ve Çalışma Mekanizmaları	18
3.2.1	Elektrostatik etki	19
3.2.2	Sterik itki.....	20
3.2.3	Van der Waals bağları	21
4.	GEOPOLİMER HAMUR VE HARÇLARIN TAZE HAL ÖZELLİKLERİ	22
4.1	İşlenebilirlik ve Kıvam	22
4.2	Priz Süresi	22
4.3	Reolojik Özellikler	23
5.	GEOPOLİMERLERDE AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI KULLANIMI....	28
6.	DENEYSEL ÇALIŞMA	31
6.1	Materyal	31

6.1.1 Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu	31
6.1.2 Alkali aktivatör	32
6.1.3 Akışkanlaştırıcı katkıları.....	33
6.1.4 Agregalar	33
6.1.5 Su	34
6.2 Metod	34
6.2.1 Aktivatör karışımının hazırlanması	34
6.2.2 Harçların hazırlanması.....	34
6.2.3 Yayılma çaplarının tespiti.....	35
6.2.4 Eğilme dayanımı.....	35
6.2.5 Basınç dayanımı	36
6.2.6 Yüksek sıcaklık direnci	37
6.2.7 SEM/EDS analizi.....	38
6.2.8 XRD analizi	39
6.2.9 Reolojik analiz.....	39
6.2.10 Temas açısı.....	40
6.2.12 Kodlama	41
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA	43

7.1	Referans Harç Karışımının Belirlenmesi	43
7.1.1	Karışım tasarımı	43
7.1.2	Basınç ve eğilme dayanımı sonuçları.....	44
7.2	Akışkanlaştırıcı Katkı İçeren Karışımlar.....	45
7.2.1	Karışım tasarımı	45
7.2.2	Basınç ve eğilme dayanımları	48
7.3	Su Miktarlarının Eşitlenmesi	50
7.3.1	Karışım tasarımı ve basınç dayanımı	50
7.4	Yüksek Sıcaklık Direnci	53
7.5	Priz Süresi	55
7.6	Reolojik Analizi	56
7.7	XRD Analizi	74
7.8	SEM Analizi	76
7.9	EDS Analizi	86
7.10	Yüzey Gerilimi ve Temas Açısı Analizi	89
8.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	91
	REFERANSLAR.....	93



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

Şekil 2.1 Düzgün küresel morfolojiye sahip F sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimini et al., 2022).	5
Şekil 2.2 Köşeli taneciklerden oluşan C sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimini, et al., 2022).	6
Şekil 2.3 Koagülasyon-kondenzasyon tepkimesi (Glukhovsky, 1994).	8
Şekil 2.4 Koagülasyon-kondenzasyon tepkimesi (Glukhovsky, 1994).	8
Şekil 2.5 Alkali hidrolizi (Wei et al., 2019).	9
Şekil 2.6 Geopolimerizasyona ait temel süreçler şeması (Duxon et al., 2007).	10
Şekil 2.7 Si/Al oranına bağlı olarak kafes yapıları (Davidovits, 2011).	11
Şekil 2.8 F sınıfı uçucu küllerin morfolojilerinin geopolimerizasyondaki etkisinin modellenmesi (Rickard et al., 2011).	13
Şekil 3.1 Çift katmanlı elektrostatik denge (Bockris et al., 1993).	19
Şekil 3.2 Tipik polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı yapısı.	21
Şekil 3.3 Van der Waals dipolün oluşturduğu kuvvet (çimento için 5-7nm mesafede).	21
Şekil 4.1 Newtonyen olmayan sıvıların sınıflandırılması (Baradan, 2011).	23
Şekil 4.2 Sıvı ve süspansiyonların reolojik davranışları (Lewis, 2000).	25
Şekil 6.1 Kullanılan kireçtaşına ait gradasyon (ASTM C33, 2018).	33
Şekil 6.2 Yayılma çapının tespiti.	35
Şekil 6.3 Eğilme dayanımı test cihazı.	36
Şekil 6.4 Basınç dayanımı deneyinin düzeneği.	37
Şekil 6.5 Yüksek sıcaklık fırını ve numunelerin dizilimi.	38
Şekil 6.6 Numuneler'in SEM/EDS test cihazına yerleştirilmesi.	39
Şekil 6.7 Reometre ve kullanılan uç.	40
Şekil 6.8 (0.1-100 rpm) aralığında kullanılan patern.	40
Şekil 6.9 Katkı içermeyen karışımlarda kullanılan kodlama.	42
Şekil 6.10 Katkı içeren karışımlarda kullanılan kodlama.	42
Şekil 7.1 Akışkanlaştırıcı katkı içermeyen geopolimer harçların basınç dayanımları.	44

Şekil 7.2 Katkısız oluşturulan karışımların eğilme dayanımı.	45
Şekil 7.3 Katkı içeren uçucu kül esaslı karışımların yayılma çapları.	47
Şekil 7.4 Katkı içeren cüruf esaslı karışımların yayılma çapları.	47
Şekil 7.5 Katkı içeren uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımları.	48
Şekil 7.6 Katkı içeren cüruf esaslı harçların basınç dayanımları.	49
Şekil 7.7 Katkı içeren uçucu kül esaslı harçların eğilme dayanımları.	49
Şekil 7.8 Katkı içeren cüruf esaslı harçların eğilme dayanımları.	50
Şekil 7.9 Sabit Ms oranı ve Na ₂ O yüzdesi olan karışımlara katkıdan gelen miktarda ilave edilen suyun basınç dayanımı ile ilişkisi.	53
Şekil 7.10 Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında basınç dayanımları.	54
Şekil 7.11 Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında eğilme dayanımları.	54
Şekil 7.12 Uçucu kül esaslı hamurların 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	57
Şekil 7.13 Uçucu kül esaslı hamurların 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	58
Şekil 7.14 Uçucu kül esaslı hamurların 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	58
Şekil 7.15 Uçucu kül esaslı hamurların 4. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	59
Şekil 7.16 Cüruf l esaslı hamurların 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	59
Şekil 7.17 Cüruf esaslı hamurların 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	60
Şekil 7.18 Cüruf esaslı hamurların 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	60
Şekil 7.19 Cüruf esaslı hamurların 4. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	61
Şekil 7.20 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	64
Şekil 7.21 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	64

Şekil 7.22 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	65
Şekil 7.23 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	65
Şekil 7.24 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	66
Şekil 7.25 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	66
Şekil 7.26 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	67
Şekil 7.27 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	67
Şekil 7.28 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	68
Şekil 7.29 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	68
Şekil 7.30 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	69
Şekil 7.31 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	69
Şekil 7.32 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	70
Şekil 7.33 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	70

Şekil 7.34 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	71
Şekil 7.35 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	71
Şekil 7.36 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	72
Şekil 7.37 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	72
Şekil 7.38 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	73
Şekil 7.39'de C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.	73
Şekil 7.40 U-1.5-10 ve U-1.5-10-P3/2 kıyaslamalı XRD spektromları.	75
Şekil 7.41 C-1.75-10 ve C-1.75-10-Nv/5 kıyaslamalı XRD spektromu.	76
Şekil 7.42 U-1.5-10 kodlu referans hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	77
Şekil 7.43 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	78
Şekil 7.44 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	79
Şekil 7.45 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	80
Şekil 7.46 U-1.5-10-L/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	81
Şekil 7.47 C-1.75-10 kodlu referans hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	82
Şekil 7.48 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	83
Şekil 7.49 C-1.75-10-P3/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	84
Şekil 7.50 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	85
Şekil 7.51 C-1.75-10-N/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.	86
Şekil 7.52 Sırasıyla U-1.5-10, U-1.5-10-P3/2, U-1.5-10-Nv/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.	87
Şekil 7.53 Sırasıyla U-1.5-10-M/5, U-1.5-10-L/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.	87

Şekil 7.54 Sırasıyla C-1.75-10, C-1.75-10-Nv/5 ve C-1.75-10-P3/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.	88
Şekil 7.55 Sırasıyla C-1.75-10-L/5 ve C-1.75-10-N/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.....	88
Şekil 7.56 Uçucu kül esashı hamurlara ait yüzey gerilimi ve temas açıları.	89
Şekil 7.57 Cüruf esashı hamurlara ait yüzey gerilimi ve temas açıları.	90



TABLOLAR DİZİNİ

Tablo

Sayfa

Tablo 2.1 Tipik bir yüksek fırın cürufuna ait kimyasal bileşim	7
Tablo 2.2 Si/Al oranına bağlı olarak geopolimer ürünün muhtemel kullanım alanları.	11
Tablo 2.3 bağ kopma enerjileri.....	14
Tablo 4.1 Farklı reolojik modellere ait ilişkiler.....	26
Tablo 6.1 Alüminosilikatların kimyasal bileşimi ve bazı fiziksel özellikleri	32
Tablo 6.2 Sodyum silikata ait bazı özellikler	32
Tablo 6.3 Akışkanlaştırıcı katkıların bazı özellikleri ve çalışmada kullanılan kısaltmaları	33
Tablo 7.1 Referans karışımların tespitinde kullanılan harç karışımları	43
Tablo 7.2 Akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlara ait karışım oranları ve bazı özellikler..	46
Tablo 7.3 Uçucu kül esaslı harçlarda su içeriğinin dayanım ve yayılma çapına etkisi.....	51
Tablo 7.4 YFC esaslı harçlarda su içeriğinin dayanım ve yayılma çapına etkisi	52
Tablo 7.5 Katkı ilavesinin uçucu kül esaslı hamurların priz süresine etkisi.	55
Tablo 7.6 Katkı ilavesinin cüruf esaslı hamurların priz süresine etkisi	56
Tablo 7.7 Karışımlar'a ait eşik kayma gerilmeleri ve viskozite değerleri	62
Tablo 7.8 Katkı içeren karışımlar ve bu karışımlarla aynı miktarda su içeren karışımlara ait viskozite değerleri ve eşik kayma gerilmeleri	74

1. GİRİŞ

Uygarlığın ilerlemesine paralel olarak insanlık, çevresini kendisine uygun hale getirmiştir. Bilim ve teknolojinin sürekli olarak gelişmesi nedeniyle insanoğlu farklı alanları kontrol altına almak ve kendisine göre şekillendirmek zorunda kalmıştır. Bugünkü medeniyetin kurulmasında en önemli alanlardan birisi inşaat mühendisliği, en önemli yapı malzemesi ise kuşkusuz betondur.

Ancak bu gelişmeler endüstriyel, çevresel, ekonomik ve sosyal sorunları da beraberinde getirmiştir. Doğal kaynakların vahşi bir şekilde tüketilmesi ve bu tüketimdeki artış, araştırmacıları önlem almaya itmiştir. Günümüzde tüm alanlardaki araştırmacıların dikkatini en çok çeken konulardan birisi ise doğal kaynak tüketimini azaltacak alternatiflerin aranmasıdır.

Beton, dünyada en çok kullanılan yapı malzemesidir. Kişi başına yıllık beton tüketimi yaklaşık olarak 3 tondur. Geleneksel betonun bağlayıcısı olan çimentonun üretimi, global CO₂ salının yaklaşık olarak %8'inden sorumludur (Scrivener et al. 2008; Gartner, 2004). Çimentonun üretim sürecinde tüketilen enerjinin %90'ı ön ısıtıcı, döner fırın ve soğutucularda kullanılmaktadır. Buna ek olarak agreganın temin edilmesi sürecinde de enerji harcanmakta ve ciddi çevresel tahribatlara neden olunmaktadır (Afkhami et al., 2015). Gelişmekte olan ülkelerde, yenilenemeyen toplam enerjinin üçte birinden fazlası inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Ahmed et al., 2020).

Türkiye'de 2021 yılında 78.9 milyon ton çimento ve 80.1 milyon ton klinker üretmiştir (TÇMB, 2021). Yine yakın zaman verilerine göre 1 ton çimento üretimi sırasında 0.59 ton, klinker üretiminde ise 0.525 ton CO₂ açığa çıkmaktadır (IEA, 2020). Tüm bunlar göz önüne alındığında çevrenin ve doğal kaynakların korunması adına çimentonun daha çevreci bir yapı malzemesi ile değiştirilmesi ihtiyacının ortaya çıktığı çok açıktır. Çimento ve hazır beton endüstrisi, yol açtığı ciddi tahribatlar nedeniyle büyük eleştirilere hedef olmaktadır. Bu eleştiriler sonucunda araştırmalar daha çevre dostu sürdürülebilir alternatif yapı malzemeleri üzerine yoğunlaşmıştır. Birçok endüstri ve disiplin, geopolimer teknolojisinin çimentoya alternatif olabileceği görüşünü paylaşmaktadır (Davidovits, 1991; Duxson et al., 2007).

Geopolimerler yüksek fırın cürufu, uçucu kül, metakaolin veya doğal puzolan gibi silis ve alümina bakımından zengin, ince taneli alüminosilikatların alkali veya asit ortamda çözünmesi ve geopolimerizasyon reaksiyonlarının sonucunda oluşur. Geopolimer üretiminde, çimentoda olduğu gibi yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmamakta, bunun yanı sıra atık malzemelerin bertarafı da sağlanmaktadır. Bu nedenlerle, geopolimerler çevreci yapı malzemeleri olarak görülmektedir (Alhawati et al., 2022). Fakat geopolimerler de her yapı malzemesi gibi farklı dezavantajlara sahiptir. Bunlardan birisi de yapışkan ve kohezif özellikleri nedeniyle işlenebilirlik problemleri yaşamalarıdır (Neupane et al., 2018). Portland çimentolu karışımlar için üretilmiş olan su azaltıcı katkıların, geopolimerlerdeki etkisi, bu konu hakkındaki çalışma sayısının limitli olmasından dolayı tam olarak anlaşılamamıştır.

1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı

Çimento sektörünün yan sektörlerinden birisi de kimyasal katkı sektörüdür. Kimyasal katkı sektörü çimento tabanlı yapı malzemelerinde kullanılabilmesi amacı ile akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, dayanım artırıcı, priz hızlandırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı gibi çok sayıda katkı üretmekte ve bunlara dair AR-GE faaliyetleri yürütmektedir. Su azaltıcı katkılar bunların en önemlilerinden biridir.

Bu çalışmada çeşitli su azaltıcı katkı tiplerinin geopolimer harç karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda lignin, mealimin sülfonat, naftalin, naftalin vinil, polikarboksilat ve polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkılar kullanılmıştır. Alüminosilikat olarak bir tanesi F sınıfı uçucu kül (UK) diğeri granüle yüksek fırın cürufu (YFC) olmak üzere iki başlangıç malzemesi ile harç ve hamur karışımları üretilmiştir. Üretilen numunelerin taze ve sertleşmiş özelliklerini belirlemek adına yayılma çapı, reolojik özellikleri, priz süresi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yüksek sıcaklık direnci, temas açısı ve SEM/EDS analizi ile mikroyapısı incelenmiştir.

2. GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİ

Alüminosilikat malzemelerin, aktivatörlerin varlığında polikondenzasyon tepkimesine girmesi sonucunda oluşan; kısa mesafede düzenli, uzun mesafede düzensiz içyapılı malzemeler geopolimer olarak tanımlanmıştır. Geopolimer kelimesi yerine literatürde alkali aktive bağlayıcı, geobağlayıcı veya hidroseramik gibi farklı isimler de kullanılmıştır. Geopolimerler, kovalent bağlı kristalin olmayan $-Si-O-Al-O-Si-$ ağları içermektedir. Burada SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral kafesleri birbirlerine bağlıdır ve oksijen moleküllerini paylaşmaktadır (Kurtuluş ve Başpınar, 2020; Davidovits, 2002).

2.1. Geopolimerlerin Kısa Tarihçesi

1940'ta Belçikalı bilim adamı Purdon; alkalilerin, yüksek fırın cürufu ile birlikte kullanılmasıyla hızlı sertleşen yeni bir bağlayıcı üretilebileceğini keşfetmiştir (Davidovits, 2011). Purdon'a göre bu işlem iki aşamada gerçekleşmekte olup ilk aşamada serbest silis, alüminyum ve kalsiyum hidroksit ortaya çıkmakta sonrasında ise alkali aktivasyonla silis, alümina hidratlar oluşmaktadır (Pacheco-Torgal et al., 2008). Trief süreci, granüle yüksek fırın cürufunun ıslak olarak öğütülmesinin akabinde bulamaç olarak portland çimentosu ile üretilen betona eklenmesi olarak tanımlanmaktadır (Hewlett ve Liska, 2019). Bu cüruf, alkalilerle aktif edilmiş, çimentoya eklenmiş ve yapı malzemesi üretiminde kullanılmıştır. Cüruf çimentoları olarak adlandırılan bu malzeme, korozyona karşı dirençli olup 1950'lere kadar yaygın olarak üretilmiştir (Davidovits, 2011). Glukhovsky 1957 yılında Antik Roma ve Mısır yapılarına ait bağlayıcıları incelemiş ve bu bağlayıcıların portland çimentosu hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan ürünlere benzer şekilde alümino-silikat ve kalsiyum hidrat içeren analsit fazlarından oluştuğunu belirtmiştir (Pacheco-Torgal et al., 2008). Glukhovsky bu çalışmalardan elde ettiği bilgileri kullanarak ürettiği yeni bağlayıcıyı "zemin çimentosu" olarak adlandırmıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde Malinowsky, Antik Mısır yapılarının tadilatı için kullanılan portland çimentosu esaslı tamir harçlarının yaklaşık olarak 10 sene içerisinde kabuk attığını tespit etmiştir. 1970'li yılların başlarında Fransa'da bulunan ve plastik üretimi yapan fabrikalarda yaşanan ciddi yangınlar Fransız bilim adamı Davidovits'i yüksek

sıcaklıklara karşı dirençli inorganik polimerler üzerine araştırma yapmaya yönlendirmiştir (Geopolimer Enstitüsü, 2002). Davidovits, 1978 yılında yapmış olduğu araştırmalar neticesinde uçucu kül gibi alüminosilikatların alkalilerle birlikte kullanılması neticesinde çimento içermeyen inorganik bir bağlayıcı üretebileceğini belirlemiş ve bunu “geopolimer” olarak isimlendirmiştir. Araştırmacı, bu malzemelerin yapısal ve kimyasal olarak doğal kayaçlarla kıyaslanabilecek performanslara sahip olabileceğini ifade etmiş ve üretim mekanizmasının termoset organik polimerlerdeki benzer bir kondenzasyondan ileri geldiğini vurgulamıştır. Daha önce bu malzeme, "soil-cement/silicates" veya alkali ile aktive edilmiş alümino-silikat çimentonun özel bir durumu olarak kabul edilmiş olup üç boyutlu çapraz bağlı polisialat zincirlerinden oluştuğu için de "geocement" olarak adlandırılmıştır (Davidovits, 1991;2011). 1994'te Krivenko, alüminosilikatların yeterli alkaliniteye sahip sulu ortamda reaksiyona girdiğini, kalsiyum esaslı bağlayıcıların da doğal koşullar altında bu reaksiyona uğradığını ve zeolit benzeri toprak alkali hidroalümina-silikatlar oluşturduğunu açıklamıştır (Krivenko, 1994).

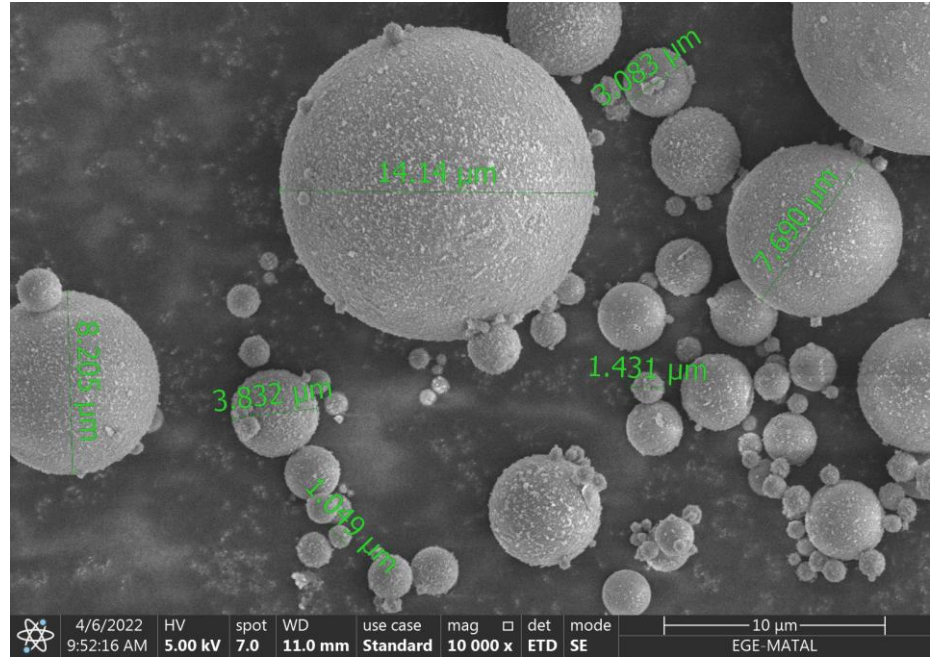
2.2. Geopolimer Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Geopolimerler, temel olarak iki ana bileşenden meydana gelmekte olup bunlar alüminosilikat mineral malzeme ve aktivatördür. Geopolimerler üzerindeki ilk araştırmalar, metakaolin, kaolin ve zeolit gibi jeolojik kökenli alüminosilikatlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Günümüzde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıkların geopolimer üretiminde kullanımı, bu atıkların çevreci bir şekilde bertaraf edilmesini sağladığı için ön plana çıkmıştır (Heath et al., 2013). Uçucu kül, cüruf veya metakaolin gibi kalsine edilmiş malzemelerin, kaolin ve kil gibi kalsine edilmemiş malzemelerden daha yüksek bir geopolimerizasyon derecesine sahip oldukları bilinmektedir (Barbosa et al., 2000, Zhu et al., 2009).

2.2.1 Uçucu kül

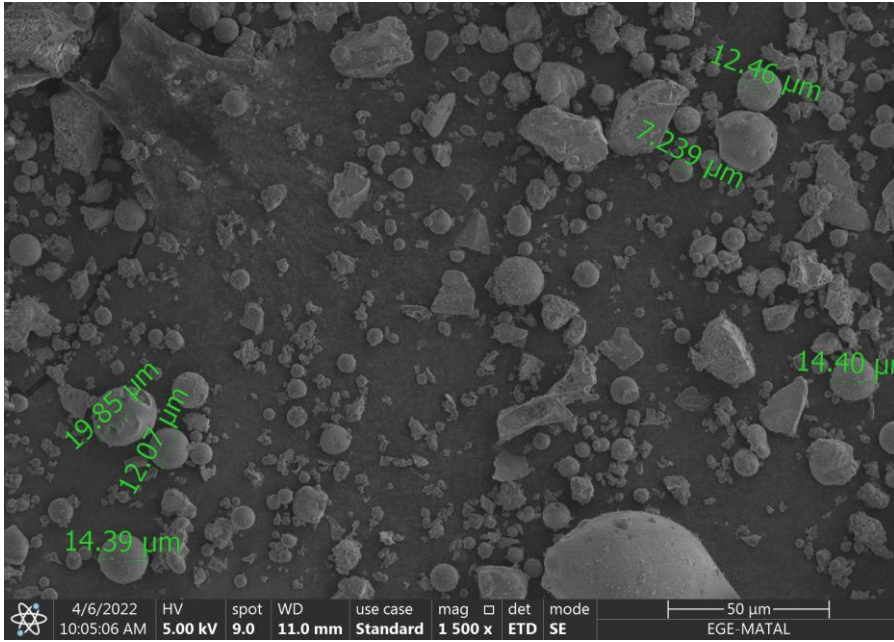
Uçucu kül, küresel ölçekte en büyük atık alüminosilikat malzemelerden birisi olup termik santrallerde yakılan taşkömürün, baca filtrelerinde tutulması ile elde edilir. ASTM C618’de göre uçucu küller farklı kategoride sınıflandırılmıştır.

- F tipi: SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi anaoksitlerin toplamı %50’nin üzerinde, CaO miktarı %18’in altındaki küller bu sınıfta tanımlanmaktadır. Bu sınıftaki uçucu küller genellikle taş kömürü veya bitüm esaslı kömürlerin yakılması sonucu açığa çıkmaktadır (ASTM C618, 2022). Genellikle tane boyutları 1-50 μm arasında olup morfolojileri küresel, yüzey dokuları ise pürüzsüzdür. Bu morfolojinin bir sonucu olarak karışımlarda işlenebilirliği artırdığı bilinmektedir. Portland çimentosu ve F sınıfı uçucu külün ikili veya üçlü kullanımıyla (silis dumanı ile) elde edilen harcın basınç dayanımının, uçucu kül veya silis dumanı ikamesi içermeyen portland çimentolu harçlarınkine, yakın bir dayanıma sahip olduğu raporlanmıştır (Moghimi et al., 2022). Şekil 2.1’de düzgün küresel morfolojiye sahip F sınıfı uçucu küle ait bir SEM görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 0.1 Düzgün küresel morfolojiye sahip F sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimi et al., 2022).

- C tipi: SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi majör oksitlerin toplamı %50'in üzerinde, CaO yüzdesi %18'dan büyük olan küller bu sınıfta tanımlanmaktadır (ASTM C618, 2022). C sınıfı uçucu küllerin kendi başına da bağlayıcı özelliği bulunmaktadır. F sınıfı uçucu külden daha düzensiz bir mikro yapıya sahip olup genellikle düzensiz ve köşeli taneciklerden oluşmaktadır. Şekil 2.2'de köşeli taneciklerden oluşan C sınıfı uçucu küle ait bir SEM görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 0.2 Köşeli taneciklerden oluşan C sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimi, et al., 2022).

2.2.2 Granüle yüksek fırın cüruf

Granüle yüksek fırın cürufunun (GYFC), geopolimer üretimindeki kullanımı Glukhovsky (1957) ve Purdon (1940) ile 1940'lı yıllara kadar uzanmaktadır. GYFC, çelik üretimi aşamasında yüksek fırında oksijen ile reaksiyona girerek demir cevherinin indirgemesi ile oluşmakta olan bir yan üründür. Temel olarak silikat, alüminosilikat, kalsiyum ve diğer bazı karakterli bileşikler içeren, yüksek fırında demir ile aynı anda ergimiş metal olmayan bir ürün olarak tanımlanabilir. Tablo 2.1'de tipik bir yüksek fırın cürufuna ait kimyasal bileşimler gösterilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufu soğutma tipine bağlı olarak iki farklı kategoriye ayrılır (ASTM C125, 2021);

- Havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu: Atmosferik koşullara bırakılan ergimiş cürufun, dış yüzeyi katılaştıktan sonra su ile soğutulması ile üretilir.
- Granüle edilmiş yüksek fırın cürufu: Ergimiş cürufun su ile ani bir şekilde soğutulması sonucu elde edilir.

Tablo 0.1 Tipik bir yüksek fırın cürufuna ait kimyasal bileşim (Deb et al., 2014).

Bileşik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	K.K.
Ağırlıkça(%)	29.9	12.2	45.4	3.9	0.5	0.5	0.3	3.6	0.04	0.4	2.3

K.K.: Kızdırma kaybı

2.2.3 Alkali aktivatör

Alkali metal oksitlerin çözelti formunun varlığında, alüminosilikat malzemenin amorf fazları hızlıca reaksiyona girerek zayıf kristalin ürünlere dönüşmektedir. Alkali çözeltinin yüksek pH değerlerine sahip olması, alüminosilikat malzemenin kovalent bağlarını tahrip ederek öncül iyonların serbest kalmasına yol açmaktadır (Reddy et al., 2016).

Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) dünya çapındaki bulunabilirliği ve maliyetinin uygun olmasından dolayı en çok kullanılan alkali aktivatörlerdir. Alkali aktivatörler, geopolimer üretiminde iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan ilki çözelti şekline getirilen aktivatörün karışıma bu şekilde eklenmesi olup bu yöntem en yaygın kullanılan yöntemdir (Duxson, 2007; Provis, 2009). İkincisi ise katı halde karışıma eklenen alkali aktivatörün, portland çimentolu sistemlere benzer şekilde su ilavesi ile reaksiyona girmesinin sağlanmasıdır (Amritphale et al., 2015; Kumar et al., 2007).

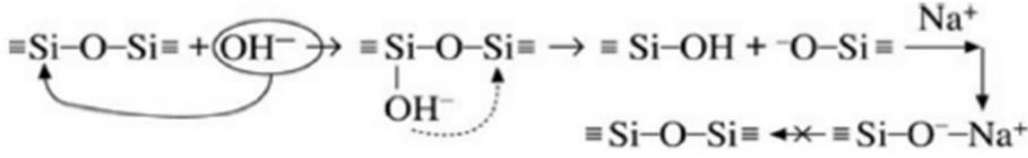
2.3 Geopolimerizasyon

2.3.1 Geopolimerizasyon mekanizması ve isimlendirilmesi

1950’de Glukhovsky, alkali aktivasyonun genel olarak üç basamakta gerçekleştiğini belirtmiştir. Bu basamaklar sırasıyla tahrip-koagülasyon,

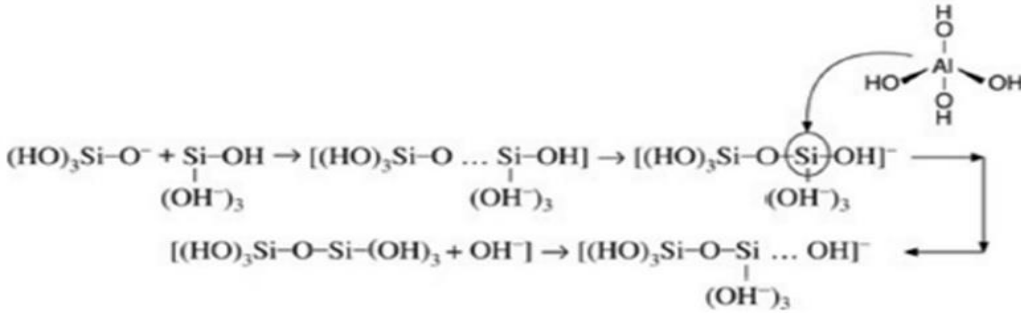
koagülasyon-kondenzasyon ve kondenzasyon-kristalizasyon olarak tanımlanmıştır (Pacheco-Torgal et al., 2008).

İlk basamak olan tahrip-koagülasyonda, aktivatörden gelen serbest OH^- iyonları, tetrahedral yapıdaki silis (SiO_4) latileri arasındaki bağı zayıflatır veya kırar. Siloksan (Si-O-Si) bağları yerine sialat ($-\text{Si-O}-$) ve silanol (Si-OH) yapıları oluşur. Bünyedeki alkali metaller (Na^+ , K^+ , Li^+), sialatları tutarak (Si-O^- -alkalimetall $^+$) tekrardan siloksan (Si-O-Si) yapısının oluşmasını engeller ve sialatta ki yük açığını dengeler. Şekil 2.3’de tahmini tepkime gösterilmiştir (Glukhovsky, 1994).



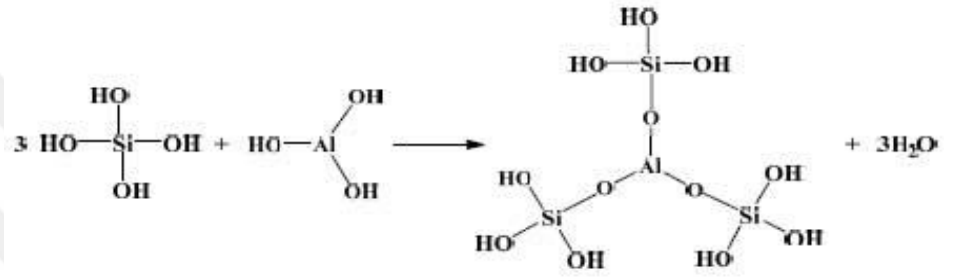
Şekil 0.3 Koagülasyon-kondenzasyon tepkimesi (Glukhovsky, 1994).

İkinci basamak olan koagülasyon-kondenzasyonda, OH^- iyonları sayesinde katalize olan silis veya alüminyum monomerleri, birbiriyle reaksiyona girerek dimerleri oluşturur. Kondenzasyon veya yoğunlaşma polimerizasyonu bu basamakta başlar ve birden fazla monomerin katıldığı ve adım adım gerçekleşen moleküller arası reaksiyon olarak tanımlanır. Tekrarlayan birimin kimyasal formülü, reaksiyona giren taraflarla aynı olmayıp ve her molekül arasındaki reaksiyonun gerçekleştiği yeni bir tekrarlayan birim oluşur. Şekil 2.4’de koagülasyon-kondenzasyon tepkimesi gösterilmiştir (Callister and Rethwisch, 2013).



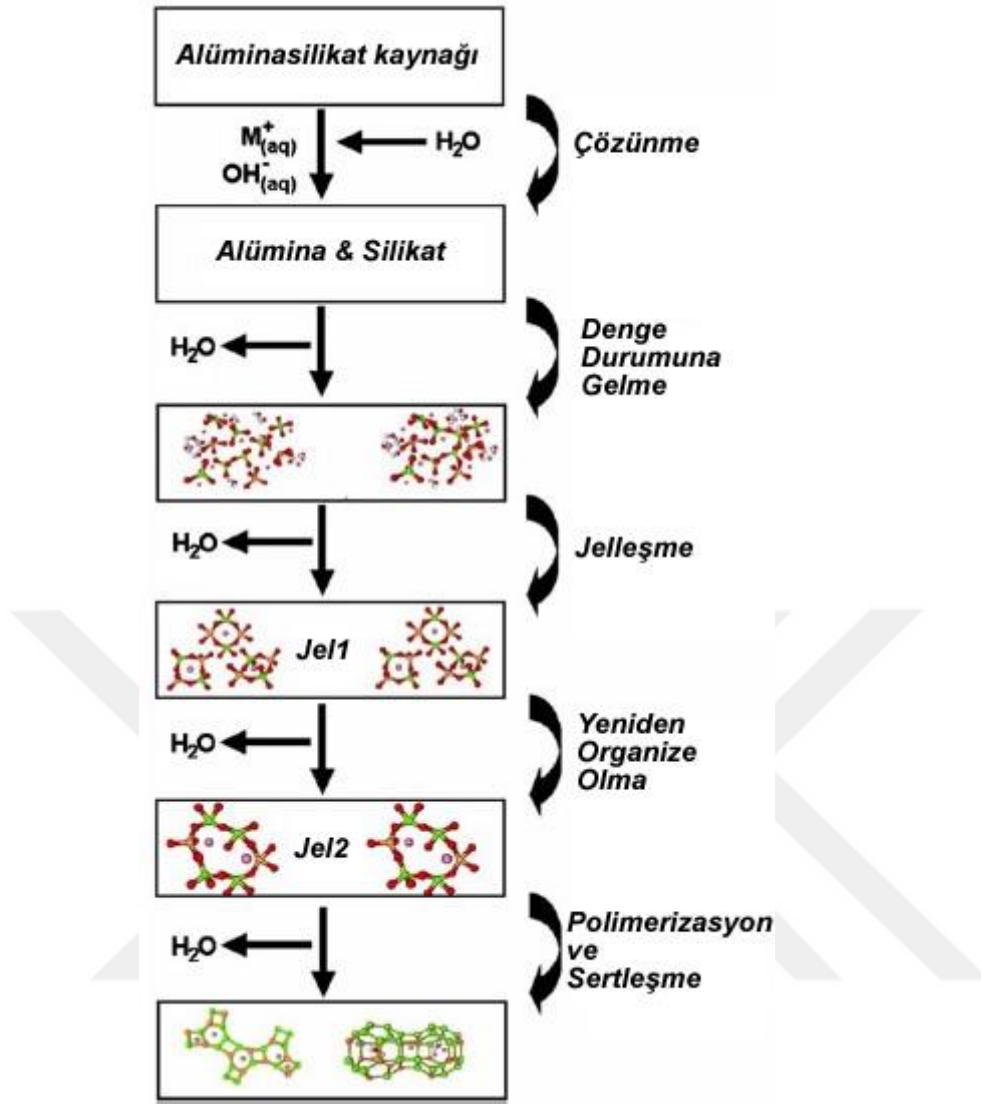
Şekil 0.4 Koagülasyon-kondenzasyon tepkimesi (Glukhovsky, 1994).

Kondenzasyon-kristalizasyon basamağında, devam eden kondenzasyonla birlikte büyüyen, kısa mesafede düzenli, uzun mesafede düzensiz bir yapı oluşur ve katı faz yapısı (jel) artıkça daha çok katı ağ ortaya çıkar. Bu jel ağları yeniden organize olarak bağlana bilirliliği artırmaya devam eder. Ayrıca alkali hidrolizinde tüketilen su bu basamakta açığa çıkar. Genelde aktivatörden gelen su sadece işlenebilirliği arttırmak ve geopolimerizasyonun gerçekleşmesi amacıyla iyon transferini sağlayacak ortam görevi görür. Su, bünyeye dâhil olmayıp boşlukların içinde kalır. Şekil 2.2.5’de alkali hidrolizinde açığa çıkan su gösterilmiştir (bu su kristal su ile karıştırılmamalıdır).



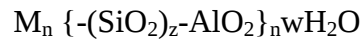
Şekil 0.5 Alkali hidrolizi (Wei et al., 2019).

Zaman ilerledikçe bu temel mekanizma diğer bilim adamları tarafından genişletilmiş ve detaylandırılmıştır. Buna göre geopolimerizasyon basamakları eş zamanlı ve birbirine bağlı bir şekilde ilerlemektedir. Geopolimerizasyona ait temel süreçler Şekil 2.6’daki görselde özetlenmiştir. Buna göre alüminosilikat, alkali ortam etkisi ile çözünmekte, devamında jelleşme işlemi gerçekleşmektedir. Oluşan jel, başlangıçta Jel 1 ve yeniden organize olduktan sonra Jel 2 olarak isimlendirilmiştir (Duxon et al., 2007).



Şekil 0.6 Geopolimerizasyona ait temel süreçler şeması (Duxon et al., 2007).

Nihai olarak oluşan üç boyutlu malzemenin tanımlanmasında aşağıdaki formül önerilmiştir:



bu denklemde:

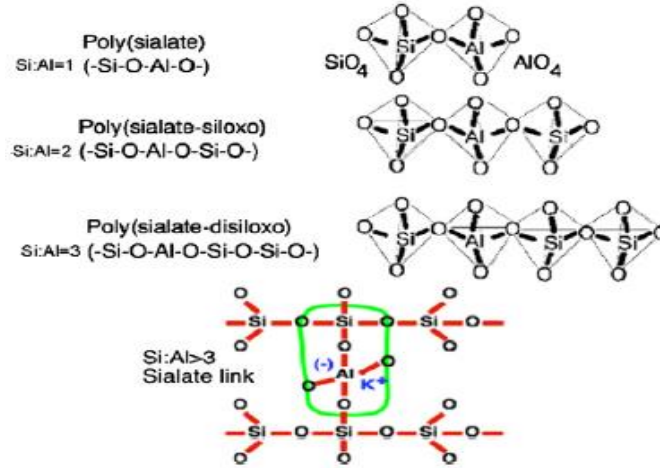
- M, potasyum, sodyum veya kalsiyum gibi bir alkali veya herhangi bir toprak alkali katyonunu,
- z, atomik Si/Al oranını,
- n, polimerizasyon derecesini,
- w ise suyun molar miktarını göstermektedir (Davidovits, 2011).

Davidovits, geopolimerlerde ki Si/Al oranına bağlı olarak ortaya çıkacak ürünün muhtemel kullanım alanlarını Tablo 2.2’de gösterildiği gibi ifade etmiştir. Si/Al oranının oluşturduğu kafes sistemi ise Şekil 2.7’de göstermiştir.

Tablo 0.2 Si/Al oranına bağlı olarak geopolimer ürünün muhtemel kullanım alanları (Davidovits, 2011).

Si/Al oranı	Kullanım alanı
1	Tuğla, seramik, yangından korunma
2	Çevreye duyarlı çimento, beton, radyoaktif veya toksik atıkların muhafaza edilmesi
3	Isıya dayanıklı kompozitler, dökümhane ekipmanları, cam elyaf kompozitler
>3	Endüstri için dolgu malzemesi
20-35	Yangına ve ısıya dayanıklı lifli kompozitler

Geopolimer üç boyutlu jel yapısı, artan Si/Al oranı ile birlikte daha kompleks bir hale gelerek farklı özellikler kazanmakta, çapraz bağlanmalar sayesinde çember şeklinde bir yapı oluşturmaktadır (Davidovits, 2011; Kolezynski et al., 2018).

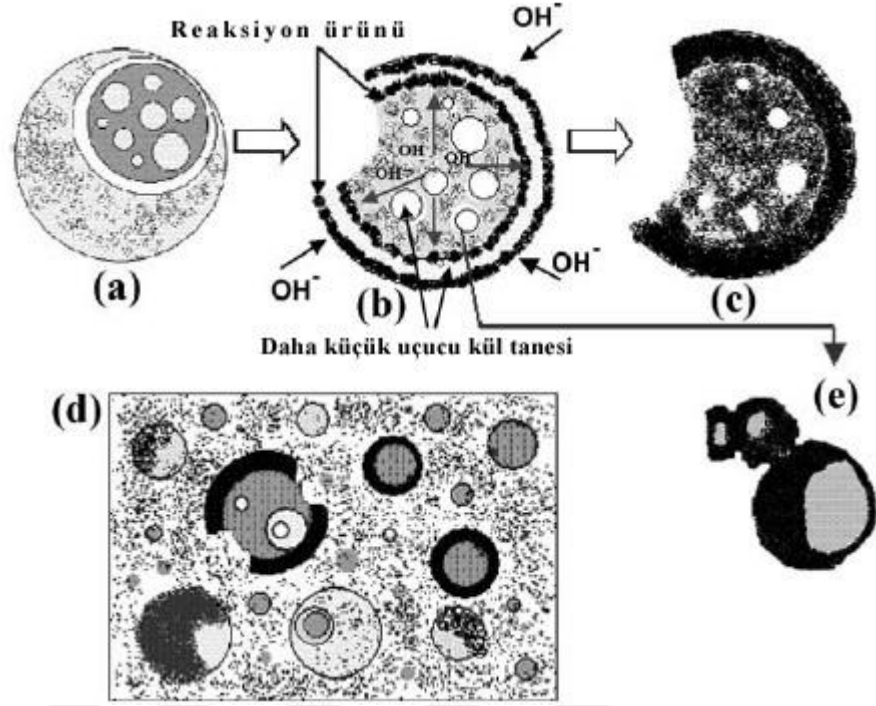


Şekil 0.7 Si/Al oranına bağlı olarak kafes yapıları (Davidovits, 2011).

2.3.2 F sınıfı uçucu külün alkali aktivasyonu

Alüminosilikat olarak kullanılan F sınıfı uçucu kül, yapısı gereği az miktarda kalsiyum oksit içermektedir. Alkaliler olduğu gibi toprak alkaliler de geopolimer jeli içerisindeki moleküler dizilimde, ağ düzenleyici olarak davranarak polimerizasyonu ve reaktivliği artırır (Newlands et al., 2017).

Düşük miktarlarda CaO içeren uçucu küllerde Si/Al oranı genel olarak 1.62-2.79 arasında değişmekte olup bu küllerin geopolimer üretiminde kullanımı neticesinde 2 boyutlu ağ yapısına sahip ürünler elde edilmektedir. Yapılan incelemelerde, tipik bir F sınıfı uçucu külde yapının yaklaşık olarak %30'unun müllit, kristal kuvars (tridimit, kristobalit) ve hematit gibi kristal bileşenlerden meydana geldiği, %70'inin ise amorf olduğu belirlenmiştir. Yani, kömür yakan termik santrallerde üretilen F sınıfı uçucu külün yalnızca %70'i kristal yapı bakımından geopolimer üretimi için uygundur (Rickard et al., 2011). Uçucu kül esaslı geopolimerlerde, kür sıcaklığı ve aktivatör derişimi gibi etkenlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Uçucu kül, aktivatör ile temasa geçtiği an monomerlere ayrılma işlemi başlamaktadır. Şekil 2.8'de F sınıfı uçucu küllerin geopolimerizasyondaki durumu modellenmiştir.



Şekil 0.8 F sınıfı uçucu küllerin morfolojilerinin geopolimerizasyondaki etkisinin modellenmesi (Rickard et al., 2011).

Şekil 2.8-a'da görüldüğü üzere başlangıçta uçucu kül taneciği üzerinde yırtıklar oluşmaktadır. Yüzeyde oluşan yırtıklar sayesinde alkaliler, taneciğin içine nüfuz edebilmekte ve Şekil 2.8-b'de görüldüğü gibi büyük kül tanelerinin içindeki daha küçük tanecikleri ile reaksiyona girebilmektedir. Devamında Şekil 2.8-c'de görüldüğü gibi büyük kürelerin içi reaksiyon ürünleriyle dolarak burada da matris oluşmaktadır. Şekil 2.8-d, klasik bir F sınıfı uçucu kül esaslı ürünün mikro yapısını göstermektedir. Ancak Şekil 2.8-e'de görselleştirildiği gibi reaksiyon ilerledikçe, tanecik yüzeyinin belirli kısımlarında oluşan ürün, reaksiyona girmemiş bölümün aktivatörle temasını önlemektedir. Reaksiyona katılmamış küresel taneler yüksek pH ortamından etkilenmemekte, reaksiyon hızı yavaşlamakta ve difüzyonla ilerleyerek bölgeden bölgeye değişiklik göstermektedir (Fernández-Jiménez et al., 2005).

2.3.3 Yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu

Alüminosilikat kaynağı cüruf olan geopolimer jelin oluşumunda bileşik yapmamış $\text{SiO}_n(\text{OH})_{4-n}^{n-}$ ve $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ monomer ürünlerinin çözünmesine bağlı

olarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$, alkali ortamda iki tip davranış göstermektedir. Bunlardan ilki silisyum ve alüminyum indirgeyerek çözünbilmesi için destekleyici rol oynaması diğeri ise hali hazırda çözünerek oluşmuş silikat ve alüminatlarla tepkimeye girerek geopolimer jel oluşumuna müdahale ettiği tespit edilmiştir (Yip et al., 2008). Tablo 2.3'te gösterildiği üzere Ca-O bağ kopma enerjisi daha düşük olduğundan çözelti ortamında Ca^{+2} iyonlarının en önce serbest duruma geçmesi beklenmektedir.

Tablo 0.3 Bağ kopma enerjileri (Speight ve Nobert , 2005)

Bağ Yapısı	Çözünme Enerjisi ($D_{298}^\circ/\text{kJ mol}^{-1}$)
Ca-O	383.3±5.0
Al-O	501.9±10.6
Si-O	799.6±13.4

Yüksek fırın cürufu tanelerinden dışarıya sızan kalsiyum iyonları hidroksil (OH^-) iyonlarıyla $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşturur. Ancak boşluk çözeltisinde kalsiyum hidroksitin oranı artarak çözünbilme sınırlarına yaklaşır ve alüminosilikat ağ öncüllerinin difüzyonunu sınırlandırır. Böylece yüksek fırın cürufu parçacıkları içerisinde C-S-H'dan gelecek olan ve fazlaca bulunan serbest kalsiyum iyonları bozulmadan kalır. Bu amorf C-S-H, çözünür silikat ile reaksiyona girerek, geopolimer alüminosilikat jelinin sadece dış katmanlarında çöker. Sonuç olarak, böyle bir sistemde iki faz bulunur; şöyle ki geçiş bölgesi boyunca önemli miktarda CH yada diğer kalsiyum çökeltileri oluşur (van Deventer et al., 2007).

Eğer aktivatör sodyum silikat ise bu mekanizma aktivatörün M_s oranına göre değişiklik göstermektedir. Düşük NaOH konsantrasyonuna sahip karışımlarda, hidroksil iyonları ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ katmanları, geçiş bölgesi boyunca ince olduğundan, az miktarlarda çözünmüş kalsiyum, alüminosilikat jel ağı ile reaksiyona girerek C-A-S-H ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$) ağı oluşturmaktadır (Lee and van Deventer, 2002).

2.4 Geopolimerizasyona Etkiyen Faktörler

Geopolimerizasyonda ana gövdeyi oluşturan Al-O-Si ağ yapısı reaksiyonlar esnasında birçok faktörden etkilenmektedir (Duxson, 2007; Provis 2009). Bu faktörler aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir:

- Kür rejimi (Duxson, 2007; Provis, 2009)
- Alüminosilikatın reaktifliği (Duxson, 2007; Provis, 2009)
- Alkali veya toprak alkali aktivatörün içeriği ve derişimi (Duxson, 2007; Provis, 2009)
- Alkali kafes bozucuların, kafes yapıcılara oranı; $\left(\frac{RO\&R_2O}{RO_2}\right)$ (HDL, 2022)
- Kafes yapıcıların, yine kafes yapıcılara veya amfoterlere oranı; $\left(\frac{RO_2}{R_2O_3}\right)$ (HDL, 2022)

(R, herhangi bir tek metal elementini ifade etmektedir.)

Silis modülü, geopolimer harç veya beton tasarımlarında önemli bir parametredir. Literatürde silis modülü, M_s oranı veya değeri olarak kısaltılmıştır. Bu değer basitçe sodyum silikat çözeltisindeki SiO_2/Na_2O oranını ifade etmektedir. M_s oranının alüminosilikat malzemenin polimerizasyon derecesini önemli ölçüde etkilediği ve böylece geopolimerin dayanım ve durabilite özellikleri üzerinde belirleyici olduğu bilinmektedir (Firdous and Stephan, 2019). Uçucu kül esaslı geopolimerlerde daha yüksek çözünürlüğe sahip silis kullanımı, iyonik silikon öncüllerinin artan doygunluğu nedeniyle çözünmeyi yavaşlatmakta ve daha büyük moleküler yapıdaki bileşiklerin çökmesini sağlamaktadır. Bu sayede daha yoğun ve ağ yapısı güçlü bir jel elde edilmesi mümkün olmaktadır (Bakharev, 2006). Çalışmalarda genellikle katı sodyum hidroksit peletleri, sodyum silikat çözeltisi içerisinde çözdürülmüş ve önceden belirlenen M_s oranına sahip çözelti elde edilmiştir. Geopolimer üretiminde kullanılmak üzere temin edilen ticari sodyum silikat çözeltisi (endüstride cam suyu olarak da bilinmektedir) sabit bir M_s oranına sahiptir. Kullanılacak aktivatörün M_s oranının, bu sabit M_s oranından daha düşük olmasının istendiği durumlarda, çözelti içerisinde sodyum hidroksit peletlerinin çözdürülmesi yeterlidir. Bu sabit orana

yaklaşıldıkça karışıma giren aktivatör miktarı da artırılır. Yani M_s oranı artıkça karışıma giren aktivatörün miktarı da artmaktadır (Firdous and Stephan, 2019; Skvara et al., 2003). Bazı çalışmalarda aktivatör hazırlarken molarite (M) ile derişim hesapları da yapılmış, bu araştırmalarda Denklem 2.1 kullanılmıştır.

$$M = \frac{n}{V} \quad \text{Denklem 2.1}$$

- Burada n çözünenin mol sayısı,
- V: Litre (l) cinsinden çözenin hacmidir.

Molarite kullanılan çalışmalarda sodyum hidroksit çözeltisi, belirlenen molarite de hazırlandıktan sonra Na_2SiO_3 ile belirlenen oranlarda karıştırılarak ya da sodyum hidroksit katısı belirlenen molarite de Na_2SiO_3 içerisinde çözdürülerek kullanılmıştır (Sharma et al., 2022; Rabie et al., 2020). Molarite ve M_s değeri kıyaslanacak olursa; hazırlanan aktivatörlerde, M_s oranlarının artmasıyla çözdürülen pelet NaOH miktarı azalmıştır. Buna müteakip, çözen sabit tutulduğundan ve çözünen kademeli bir şekilde azaltıldığından molarite de azalmıştır (Tuyan et al., 2018).

3. BETON TEKNOLOJİSİNDE KULLANILAN KİMYASAL KATKILAR

3.1 Katkıların Sınıflandırılması

Portland çimentosu esaslı yapı malzemesi üretiminde hazırlanan karışımlar için, betonun taze ve sertleşmiş özelliklerini değiştirmek amacıyla farklı kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Beton için kullanılan kimyasal katkıların sınıflandırılması ASTM C494 (2020) standardına göre aşağıdaki gibidir;

- Tip A: Su azaltıcı katkıları.
- Tip B: Priz geciktirici katkıları.
- Tip C: Hızlandırıcı katkıları.
- Tip D: Su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları.
- Tip E: Su azaltıcılar ve hızlandırıcı katkıları.
- Tip F: Yüksek oranda su azaltıcı katkıları.
- Tip G: Yüksek oranda su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları.

Benzer şekilde TS EN 934-2'göre beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıların sınıflandırılması aşağıda gösterildiği gibidir;

- Su azaltıcı (akışkanlaştırıcı) katkıları.
- Yüksek oranda su azaltıcı (süper akışkanlaştırıcı) katkıları.
- Hava sürükleyici katkıları.
- Priz hızlandırıcı katkıları.
- Priz geciktirici katkıları.
- Su tutucu katkıları.
- Su geçirimsizlik katkıları.
- Sertleşmeyi hızlandırıcı katkıları.
- Su azaltıcı (akışkanlaştırıcı) ve priz geciktirici katkıları.
- Yüksek oranda su azaltıcı (süper akışkanlaştırıcı) ve priz geciktirici katkıları.
- Su azaltıcı (akışkanlaştırıcı) ve priz hızlandırıcı katkıları.

Geopolimerlerin inorganik polimerler olduğu düşünülürse polimer endüstrisinde kullanılan katkıların da bu bölümde sınıflandırılması mantıklı olacaktır (Davidovits, 1991;1993). Genel anlamda polimer endüstrisinde kullanılan katkıları şu şekilde sınıflandırılabilir (Callister and Rethwisch, 2013):

- Dolgu malzemesi katkıları.
- Yumuşatıcı katkıları.
- Dengeleyici (stabilizatörler) katkıları.
- Renklendirici katkıları.
- Alev geciktirici katkıları.

3.2 Su Azaltıcı (akışkanlaştırıcı) Kimyasal Katkıları ve Çalışma

Mekanizmaları

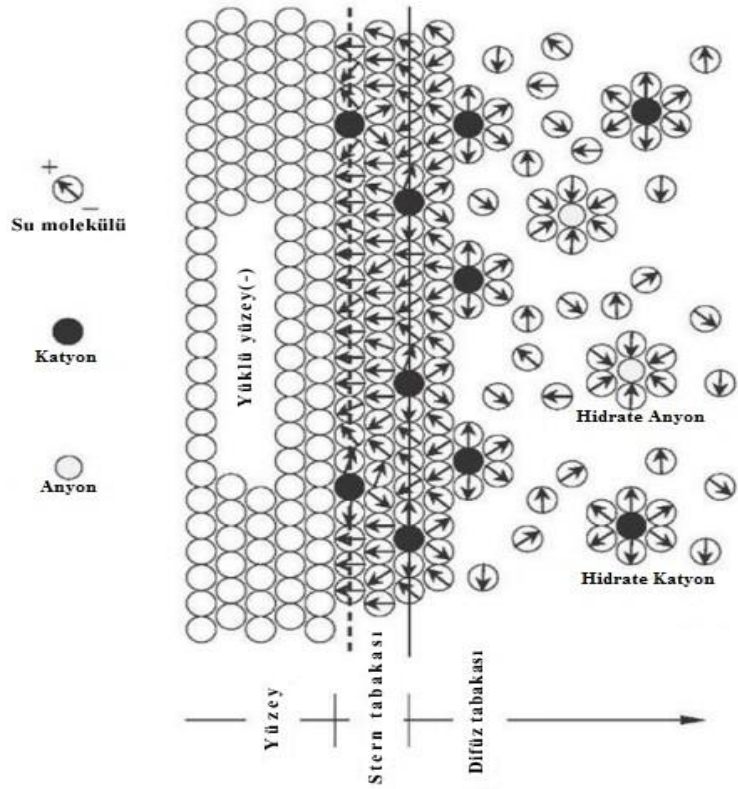
Su azaltıcı katkıları, temel olarak katı-su ara yüzeyinde adsorbe olabilen genellikle negatif yüklü organik moleküllerdir (Mindess et al., 2003).

Günümüzde portland çimentolu sistemler için endüstriyel su azaltıcı katkıları vazgeçilmez değerdedir. İnşaat sektöründeki gelişmeye paralel şekilde kimyasal katkı endüstrisi de büyümektedir. Ancak kimyasal katkı endüstrisinin hazır beton ve çimento sektöründen daha hızlı büyüdüğü tespit edilmiştir. 2010 yılından bu yana ülkemizde su azaltıcı katkı kullanımının 2-3 kat arttığı bilinmektedir (KÜB, 2021). Akışkanlaştırıcı katkıları, çimento topraklarını dağıtarak karışım suyu azaltmaktadır. Sonuçta, betonun dayanım ve durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir.

İlk nesil akışkanlaştırıcı katkıların su kesme yetenekleri yaklaşık olarak %5 iken yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkıların %12'den fazla su azaltabildikleri bilinmektedir (TS EN 934-2+A1, 2013). Yeni nesil olarak da bilinen SMF ve SNF (sodyum melamin sülfonat ve sodyum naftalin sülfonat) kökenli üretilen polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcılar, sülfonik grubu maddeler içermedikleri için bazik ortamda tamamen iyonize olmakta ve yüksek reaktifliklerinin bir sonucu olarak %25-30 oranında su azaltabilmektedir (TMMOB, 2017).

3.2.1 Elektrostatik etki

Çoğu katı, tane yüzeyi sulu bir çözelti içerisinde yüklü bir haldedir. Bunun ana nedeni suyun yüksek dielektrik geçirgenliği ve iyi bir iyon çözücü olmasıdır. Yüzey yükleri, yüzey gruplarının çözünmesinden veya iyonik zincirlerin adsorpsiyonundan kaynaklanır. Yüklü bir ara yüzeyde iyonların dağılımının, iki bölge arasındaki ayrımını yapan ilk çalışma Gouy-Chapman'ın çift katmanlı modelidir (Gelardi, 2016). Modele göre yüzey yükleri tarafından hareketsiz kılınmış ve yüzey yüklerine zıt işaretlerle yüklü iyonların bulunduğu katman, stern (iç) tabaka, stern katmanı ile aynı işaret yoğunluğuna sahip serbestçe hareket edebilen katman ise, difüz (dış) tabaka olarak tanımlanmıştır. Bu model 1963'te Bockris vd. (1993) tarafından Şekil 3.1'de gösterildiği gibi detaylandırılmıştır. Burada, yüklü bir katı metal yüzeyi üzerinde sulu çözeltilerin oryantasyonu incelenmiştir. Buna göre yüzey üzerinde oluşan stern tabakaya ait iyonlar, serbestçe hareket edebilen difüz tabakasından daha yoğundur (Endo et al., 2001).



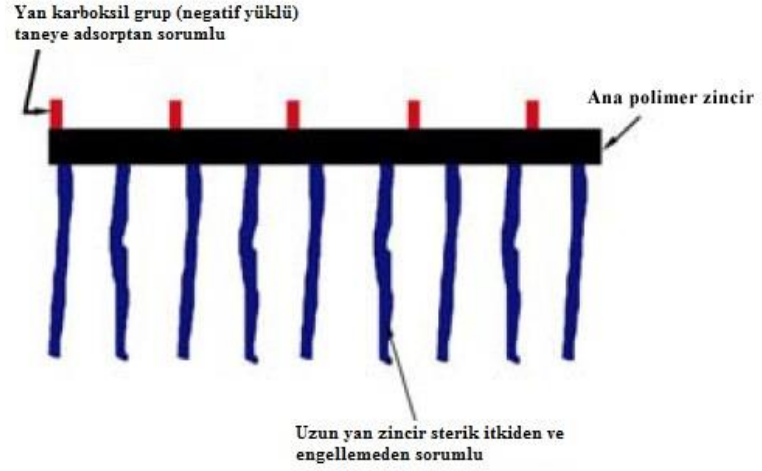
Şekil 3.1 Çift katmanlı elektrostatik denge (Bockris et al., 1993).

Benzer yüklerle yüklenen difüz ve stern tabakalar, taneler arasında itme kuvveti oluşturur. Karışıma tane yüzey yükünün işaretine göre dışarıdan eklenen negatif veya pozitif işaretli herhangi bir akışkanlaştırıcı ajan, difüz tabakaya katılarak karışımı topaklaştırır veya dağıtabilir (Bockris et al., 1993).

Çimento tanesi yüzeyinde Ca^{+2} , Al^{+3} , Si^{+4} atomlarının serbest değerlik elektronlarının bulunmasından dolayı çimento hamurunun katyonik bir yapısı vardır. Benzer şekilde cüruf ve uçucu külde de bu atomların çeşitli bileşikler veya fazları bulunmaktadır. Yapılan bir araştırmaya göre akışkanlaştırıcı katkıları, çimento tanesine uçucu külden daha fazla adsorbe olmaktadır. Araştırmacılar bunun ana nedeninin çimento tanesinin su ile daha reaktif bir tutum sergilemesi olduğunu düşünmektedir (Wang et al. 2019).

3.2.2 Sterik itki

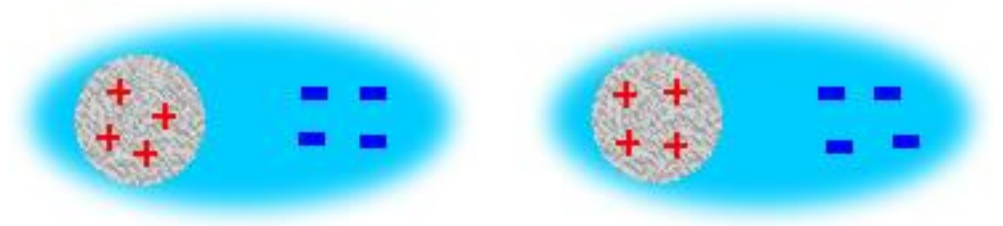
Sterik itki, adsorbe olan polimerin yan zinciri ile alakalıdır. Atomlar birbirine yaklaştığında molekülün enerjisi artmakta, iyon ve moleküllerin reaktivitesi bağ yapmayan bu yan zincirleri etkilemektedir. Sterik itki, benzer yüklerle örtüşen bu elektron bulutlarının oluşturduğu itme kuvvetiyle tanımlanmaktadır. Boşluktaki bu serbest yan zincirler reaksiyona isteksiz olduğundan, adsorbe oldukları tane reaktanlarının birbiriyle reaksiyonunu engellemekte veya yavaşlatmakta olup bu olay “sterik engelleme” olarak isimlendirilmektedir. Sterik engelleme, istenilmeyen yan reaksiyonların yavaşlatılması veya engellemesi gibi seçici durumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 3.2’de ana zincire bağlı uzun yan zincirler gösterilmiştir (Collepardi et al., 2005).



Şekil 3.2 Tipik polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı yapısı.

3.2.3 Van der Walls bağları

Van der Walls bağları, molekül veya atomal dipollerden kaynaklanmakta olup neredeyse tüm moleküllerde bulunmaktadır. Pozitif veya negatif kutup arasındaki mesafeden dolayı her zaman bir elektriksel dipol (iki kutuplu) oluşumu söz konusudur. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere dipolün pozitif ve negatif kutbu arasında Coulomb çekim kuvveti sonucu, Van der Walls bağı oluşur. Bu tip bağlanmalarda, enerji bağ kuvveti yaklaşık olarak 10 kJ/mol (0.1 eV/atom) mertebesinde (Callister and Rethwisch, 2013).



Şekil 3.3 Van der Walls dipolün oluşturduğu kuvvet (çimento için 5-7nm mesafede).

4. GEOPOLİMER HAMUR VE HARÇLARIN TAZE HAL ÖZELLİKLERİ

4.1 İşlenebilirlik ve Kıvam

Akış özellikleri işlenebilirlik özelliklerinin bir temsili olarak kullanılmaktadır. Çimentolu harçların yayılma çapı, basit ve kolay bir şekilde ASTM C 1437 standardına göre ölçülebilmektedir. Ölçümde standart harç kalıbı, tokmak, sarsma platformu, mala ve cetvel kullanılmaktadır (ASTM C 1437, 2020).

Aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat çözeltisi, yüksek bir viskoziteye sahiptir. Uçucu kül/alkali çözeltisi veya sodyum silikat/sodyum hidroksit oranının artmasıyla geopolimer harcın akışkanlığının azaldığı ve işlenebilirliğin artması için ilave su kullanılması gerektiği bilinmektedir. Her ne kadar ilave su veya katkı kullanımı ile işlenebilirlikte iyileşmeler görölse de bunlar mekanik özellikleri olumsuz olarak etkileyebilmektedir (Jumrat et al., 2010; Chindaprasirt et al., 2007). İşlenebilirliğin, karışımda kullanılan agreganın tane boyut dağılımı gibi faktörlerden de etkilendiği, ayrıca aktivatördeki $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının artmasıyla, kohezifliğin arttığı da ifade edilmiştir (Bhowmick and Ghosh, 2012). Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit miktarı ile işlenebilirlik arasında ters orantı bulunmaktadır (Malkawi et al., 2016). Ayrıca kullanılan aktivatör tipinin de akış özellikleri üzerinde etkili olduğu raporlanmıştır (Huseien et al., 2016).

4.2 Priz Süresi

Çimento hamurunun priz süreleri ASTM C 807 standardı kullanılarak belirlenebilmektedir (ASTM C 807-21, 2021). Ancak, geopolimerlerin priz süresi için ayrı bir standart bulunmadığından araştırmalarda geopolimer hamur için priz süresi tayininde de bu standart kullanılmıştır. Uçucu kül esaslı geopolimerlerde sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı ve uçucu kül/aktivatör oranının artmasının priz süresini azalttığı tespit edilmiştir (Jumrat et al., 2010). Cüruf ikamesi içeren uçucu kül esaslı geopolimerlerdeki priz süreleri incelendiğinde cüruf miktarının artmasıyla priz sürelerinin azaldığı görölmüştür (Al-Majidi et al., 2016). Aktivatör

olarak sadece sodyum silikat çözeltisi kullanılan geopolimerlerin, sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı aktivatör kullanılan geopolimerlerden daha uzun bir priz süresine sahip olduğu da vurgulanmıştır (Laskar and Talukdar, 2017).

4.3 Reolojik Özellikler

Reoloji, cisimlerin sabit veya dinamik bir gerilme altında zamana bağlı şekil değişimini inceleyen disiplin olup katıların deformasyon, sıvıların ise akış özelliklerini araştırmada kullanılmaktadır. Viskozite, reoloji biliminde önemli bir değişken olup sıvı katmanlarının birbirine göre bağıl hareketine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmakta ve paskal.saniye birimi ile ifade edilmektedir ($1\text{Pa.s} = 1\text{N.s/m}^2$). Herhangi bir sıvının viskozitesinin belirlenmesinde viskozite katsayısı (η) kullanılmaktadır. Sıvının viskozite ve viskozite kat sayısı, doğrusal bir kayma gerilmesine tekabül ediyorsa sıvı Newtonyen, sıvı viskozitesi ve kayma gerilmesi arasında doğrusallık yoksa sıvı Newtonyen olmayan olarak tanımlanmıştır. Newtonyen olmayan sıvıların reolojileri Şekil 4.1’de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır (Baradan, 2011; Hackley and Ferraris, 2001).



Şekil 4.1 Newtonyen olmayan sıvıların sınıflandırılması (Baradan, 2011).

Şekil 4.1’de gösterilen farklı reolojik davranışların bir veya birkaçının aynı malzemede görülmesi mümkündür. Burada reolojik davranışı belirleyen etkenler gerilme seviyesi veya gerilmeye maruz kalınan süredir (Baradan, 2011). Newtonyen sıvılar için kayma gerilmesi (τ) Denklem 4.1’de gösterilmiştir. Şekil

4.1 (A) 'da olduğu gibi patern sergiler ve (B)'de görüldüğü üzere viskozite (η), deformasyon hızından ($\dot{\gamma}$) bağımsızdır.

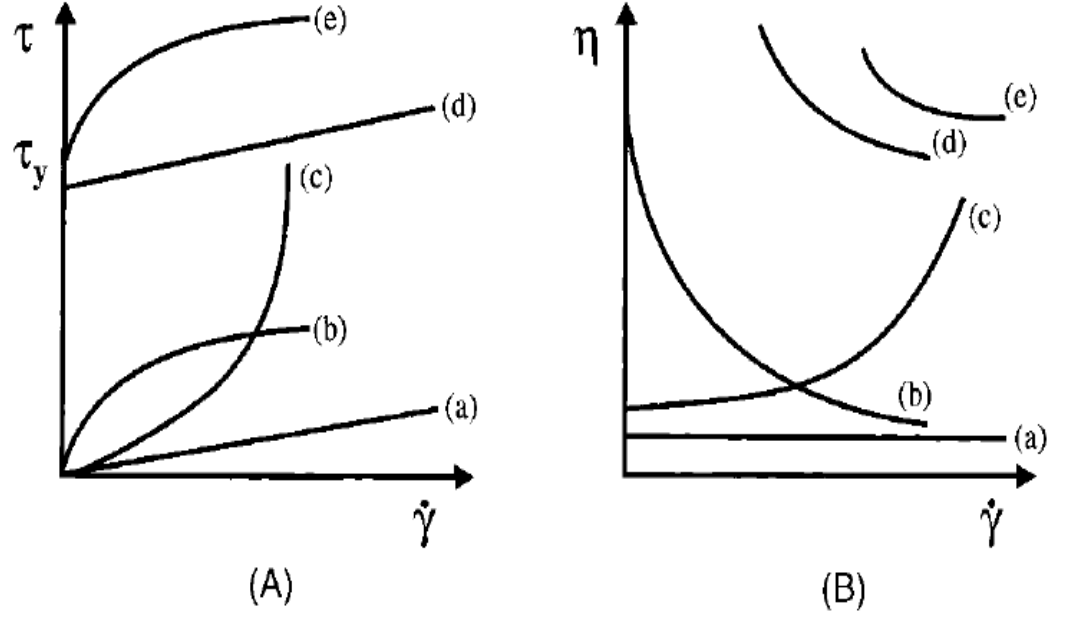
$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

Denklem 4.1

burada

- η , viskoziteyi
- $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ deformasyon hızını ifade etmektedir (Lewis, 2000).

Katı parçacık konsantrasyonu yüksek süspansiyonlar genellikle Newtonyen olmayan reolojik davranış gösterir. Şekil 4.2 (A)-b'de gösterildiği üzere psödoplastik (kayma incelmesi) davranışı viskozitenin deformasyon hızına bağlı olarak azaldığı durumlarda görülür. Bu durumda malzeme düşük gerilme seviyelerinde plastik, yüksek gerilme seviyelerinde ise viskoz davranış göstermektedir. Şekil 4.2 (A)-d,e'de Bingham plastik modeline ait davranış gösterilmiştir. Burada psödoplastik davranıştan farklı olarak eşik bir kayma gerilmesi bulunmaktadır ve bu eşik kayma gerilmesi (τ_0) süspansiyon içerisindeki katı taneciklere bağlı olarak değişmektedir. Bu tip sıvılar, belirli bir kayma gerilmesinden sonra akışa geçebilirler. Plastik davranış sergileyen herhangi bir sıvı, eşik kayma gerilmesini aştıktan sonra Newtonyen, psödoplastik veya dilatant davranış sergileyebilir. Son olarak Şekil 4.2 (A)-c'de dilatant (kayma kalınlaşması) davranış gösterilmiş olup burada deformasyon hızının artışıyla viskozite de artmaktadır. Yani bu davranış psödoplastik davranışın zıttıdır ve psödoplastik davranışa göre daha ender rastlanmaktadır (Lewis, 2000; Baradan, 2011).



Şekil 4.2 Sıvı ve süspansiyonların reolojik davranışları (Lewis, 2000).

Şekil 4.2 (A)-e 'de eşik kayma gerilmesine sahip ve viskozite indeksini (n) olan sıvı, Tablo 4.1'de $0 < n < \infty$ olduğu için Herschel-Bulkley modeline ait denklem ile yorumlanır. Herschel-Bulkley modeline ait Denklem 4.2' de ifade edilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma})^n$$

Denklem 4.2

burada

- τ , Kayma gerilmesini,
- τ_0 , Eşik kayma gerilmesini,
- η , Viskoziteyi,
- n , Viskozite indeksini,
- $\dot{\gamma}$, Deformasyon hızını temsil etmektedir.

Şekil 4.2 (A)-d'de Bingham modeli gösterilmiş olup eşik bir kayma gerilmesi mevcuttur, eğri lineer olduğu için n , 1'e eşit olmaktadır. Tablo 4.1'den uygun değerlere sahip Bingham modeli seçilmektedir. Bingham modeline ait Denklem 4.3'de ifade edilmiştir.

$$\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$$

Denklem 4.3

burada

- τ , Kayma gerilmesini,

- τ_0 , Eşik kayma gerilmesini,
- η , Viskoziteyi,
- $\dot{\gamma}$, Deformasyon hızını belirtmektedir.

Tablo 4.1 Farklı reolojik modellere ait ilişkiler (Rubio-Hernández, 2018).

Model	η (Pas ⁿ)(viskozite katsayısı)	n (viskozite indeksi)	τ_0 (eşik kayma gerilmesi)
Herschel-Bulkley	> 0	$0 < n < \infty$	> 0
Newtonyen	> 0	1	0
Power-Law	> 0	$0 < n < 1$	0
Bingham	> 0	1	> 0
Kayma kalınlaşması	> 0	$1 < n < \infty$	0

Geopolimerin reolojik davranışları ile ilgili bazı çalışmalar yürütülmüştür. Revathi et. al. (2016) F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer harç karışımları üzerinde deformasyon hızları 100, 200, 300, 400 ve 500 s⁻¹ olacak şekilde her bir noktada 20 saniye beklenerek reolojik analiz gerçekleştirmiştir. Buna göre 8 M derişimli sodyum hidroksit çözeltisi ile hazırlanan geopolimerde eşik kayma gerilmesinin sıfır olduğu, kayma gerilmesi deformasyon hızı grafiğinin de lineer şekilde ilerlediği tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu davranışı Newtonyen olarak yorumlamış daha yüksek molariteler de aktivatör içeren karışımların ise dilatant (kayma kalınlaşması) davranış sergilediği raporlanmıştır (Revathi et al., 2016).

Sitarz (2020) cüruf ikamesinin F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer harçların reolojik özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırmada cüruf ağırlıkça %10, 30 ve 50 oranlarında ikame edilmiş ve 1.7 M derişimli sodyum silikat çözeltisi aktivatör olarak kullanılmıştır. Reometre 20 saniyede 200 ölçüm alacak şekilde ayarlanmış ilk ölçümden 15 ve 20 dakika sonra ölçümler tekrarlanmıştır. Araştırmacılar, cüruf ikamesinin artmasıyla eşik kayma gerilmesinin yükseldiğini, ilk ölçüm ve sonrasındaki ölçümler arasında reolojik olarak önemli bir fark gözlemlenmediğini raporlamıştır. Davranışın psödoplastik olduğu bu nedenle de Herschel-Bukley ile modellenilebileceği de belirtilmiştir (Sitarz, 2020).

Alnahhal vd., (2020)'nin gerçekleştirdiği benzer bir çalışmada F sınıfı uçucu küle %10, 20, 30 ve 40 oranlarında cüruf ikame edilmiş ve cüruf ikamesinin

reoloji üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bütün karışımlarda M_s oranı 0.9-1.0 olarak sabitlenmiş, ölçümler ön kesmesi 100 s^{-1} ve 60 ölçüm olacak şekilde akabinde 60 saniye bekleme süresi verilerek kayma deformasyon hızı 100 s^{-1} ve 45 ölçüm olacak biçimde yapılmıştır. Araştırmacılar karışımların eşik kayma gerilmelerinin önemsiz mertebede olduğunu ifade ederek Bingham modeli yerine Newtonyen davranış modellemesi yapılabileceğini raporlamıştır (Alnahhal et al., 2020).



5. GEOPOLİMERLERDE AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI KULLANIMI

Akışkanlaştırıcı katkıları beton sektöründe uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu katkıların ilk kullanımı 1940'lı yıllara kadar uzanmaktadır. Bu yıllarda lignosülfonat, sonrasında 1960'lı yıllarda daha yüksek oranda su kesme özelliğine sahip olan sülfonat naftalin formaldehit, sülfonat melamin formaldehit ve devamında 1980'li yıllarda çok yüksek miktarda su kesen katkıları geliştirilmiştir. Bu katkıların geopolimer üzerindeki etkisinin bilinmesi, geopolimerlerin yaygın kullanılan bir yapı malzemesi olabilmesi için önemli ve gereklidir. Ancak bu konudaki çalışma sayısı sınırlı olup akışkanlaştırıcıların geopolimerler üzerindeki etkisi tam olarak anlaşılamamıştır (Carabba et al., 2016)

Nematollahi and Sanjayan (2014), F sınıfı uçucu kül, sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanarak ürettiği geopolimer hamurları üzerinde incelemeler gerçekleştirmiş; farklı katkıların geopolimer özelliklerine farklı etkiler yaptığını, bazı katkı türlerinin yayılma çapını arttırmasına rağmen mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Çalışmada akışkanlaştırıcı olarak üç farklı modifiye polikarboksilat, iki farklı naftalin ve bir adet de melamin esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit kullanılması durumunda naftalin esaslı akışkanlaştırıcının dayanıma olumsuz bir etki yapmadan mini çökme değerini %136 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit-sodyum silikat çözeltisi kullanıldığında ise polikarboksilat bazlı katkıların hamurun mini çökme değerini %39-45 oranında arttırdığı ancak basınç dayanımlarda %30'a varan azalmalara neden olduğu raporlanmıştır.

Mithanthaya et al. (2016) alüminosilikat olarak F sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanarak akışkanlaştırıcı katkıların geopolimer üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada aktivatör olarak 8 M NaOH çözeltisi, akışkanlaştırıcı olarak naftalin esaslı katkı kullanılmış ve karışıma ağırlıkça %20'ye kadar cam tozu eklenmiştir. Sonuçta, akışkanlaştırıcı kullanımı ile basınç dayanımlarında %20 oranında artış tespit edilmiştir.

Laskar and Talukdar (2017) çok ince öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün beraber kullanılması ile üretilen geopolimer harçlarda, farklı miktarlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ve farklı alkali aktivatör derişimlerinin işlenebilirlik, priz süresi, basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Katkı dozajı olarak bağlayıcı ağırlığınca %0, 0.5, 1.5 ve 3.0 oranları seçilmiştir. Katkı kullanılan karışımların priz sürelerinin kullanılmayan karışımlardan fazla olduğu, katkı miktarı arttıkça akış özelliklerinin de iyileştiği sonuçlarına ulaşılmıştır. %0.5 katkı dozajının basınç dayanımının artmasını sağladığı daha yüksek dozajlarda ise basınç dayanımlarının azaldığı bildirilmiştir.

Malkawi et al. (2017) farklı türdeki akışkanlaştırıcı katkıların yüksek kalsiyum içeren uçucu kül esaslı geopolimer harçlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Aktivatör olarak 10 M derişimli NaOH çözeltisinin kullanıldığı çalışmada lignin ve polikarboksilat esaslı katkılar kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıların işlenebilirlik özelliklerine olumlu etkisi olduğu belirtilen çalışmada en iyi performansın lignin esaslı katkıda elde edildiği bildirilmiştir. Lignin esaslı katkıların priz süreleri kısalttığı, polikarboksilat esaslı katkıların ise priz sürelerini uzattığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar, katkı kullanımı ile basınç dayanımlarında düşüşler yaşandığını, 28 günlük numuneler üzerinde yapılan deneylerde lignin ve polikarboksilat esaslı katkıların basınç dayanımlarını sırasıyla %12.4 ve %19.8 oranında azalttığını raporlamıştır.

Bakharev et al. (2000) akışkanlaştırıcı katkı kullanımının, cüruf esaslı alkali aktive betonlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum karbonat kullanılırken akışkanlaştırıcı katkı olarak ise modifiye naftalin formaldehit ve lignosülfonat kullanılmıştır. Tüm aktivatör tiplerinde akışkanlaştırıcı kullanımı ile işlenebilirliğin arttığı, naftalin formaldehit esaslı katkının ani prize yol açtığı, lignosülfonat esaslı katkının dayanım kazanımını yavaşlattığı ve nihai eğilme dayanımını azalttığı raporlanmıştır.

Aliabdo et al. (2016) ilave su, kimyasal katkı, sodyum hidroksit molaritesi, çözelti/kül ve sodyum hidroksit/sodyum silikat oranlarının uçucu kül esaslı geopolimer betonlar özellikleri üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Üretilen geopolimer betonlarda ilave su da dâhil olmak üzere malzeme miktarları sabit

tutulmuş ve karışıma 2.5, 5.0, 7.5 ve 10 kg/m³ miktarlarında naftalin bazlı akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Katkı miktarındaki artış ile işlenebilirliğin arttığı, çökme değerlerinin 40 mm'den 90 mm'ye yükseldiği ancak basınç dayanımlarının 30 MPa'dan yaklaşık olarak 25 MPa'a; eğilme dayanımları ise yaklaşık olarak 3.5 MPa'dan 2.8 MPa'a düştüğü raporlanmıştır.

Carabba et al. (2016) F sınıfı uçucu kül, sodyum silikat, 8M sodyum hidroksit ve silika kumu kullanarak ürettikleri harç karışımları üzerinde bir araştırma gerçekleştirmiştir. Çalışmada lignosülfonat, sodyum lignosülfonat, polinaftalemetan sülfonat, sülfonat melamin, polikarboksilik eter ve modifiye akrilik esaslı kimyasal katkıları kül ağırlığınca %0.6 ve 1 oranlarında kullanılmıştır. Araştırmacılar polikarboksilik eter bazlı akışkanlaştırıcının yayılma üzerinde en etkili katkı olduğunu ve görece yayılma değerini %10 arttırdığını, %0.6 dozajındaki sodyum lignosülfonat esaslı katkının görece yayılma değerinde %2.25'lik bir düşüşe sebep olduğunu raporlamıştır. Diğer katkı türlerinin yayılmayı %2-7 aralığında arttırdığı ancak mekanik özelliklerde kayda değer bir değişim gözlemlenmediği de belirtilmiştir.

Demie et al. (2011), F sınıfı uçucu külü sodyum hidroksit-sodyum silikat karışımı çözelti ile birlikte kullanarak ürettiği betonlar üzerinde bir seri deney gerçekleştirmiştir. Akışkanlaştırıcı, kül ağırlığınca %3, 4, 5, 6 ve 7 oranında kullanılırken karışımların yayılma çapları, t₅₀ süreleri, V hunisi akış süreleri ve L kutusu oranları tespit edilmiştir. Katkı miktarının artışı ile yayılma çapının 625 mm'den 710 mm'ye, L kutusu oranının 0.84'ten 0.96'ya yükseldiği; t₅₀ süresinin 6.5 saniyeden 4 saniyeye, V hunisi akış süresinin ise 15.5 saniyeden 7 saniyeye indiğini raporlamıştır.

Su azaltıcı katkıların geopolimer karışımlarının işlenebilirlik, priz süresi ve dayanımı üzerindeki etkileri hakkında literatürde çelişkili sonuçlar rapor edildiği yukarıdaki taramadan anlaşılmıştır. Ayrıca çalışmaların birçoğunda katkıdan gelen su, karışımlarda dikkate alınmamış dolayısıyla işlenebilirlik ve dayanım değerlerindeki değişimlerin mertebeleri tam olarak açıklığa kavuşturulamamıştır. Bu çalışma söz konusu çelişki ve belirsizlikleri aydınlığa kavuşturmak için yapılmıştır.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada alüminosilikat olarak F sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu, aktivatör olarak sodyum silikat çözeltisi ve pelet şeklindeki sodyum hidroksit, agrega olarak kırma kireçtaşı kumu, akışkanlaştırıcı olarak ise farklı nitelikteki 7 ticari su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Deneysel çalışma 3 aşamadan oluşmakta olup ilk aşamada 3 farklı M_s oranı (1.25, 1.50 ve 1.75) ve 3 farklı Na_2O yüzdesi (%5, 7.5 ve 10) ile harç karışımları üretilmiş ve üretilen numuneler $60^\circ C$ 'de 3 gün kürlenerek eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Bu aşamada her alüminosilikat için en yüksek basınç dayanımının elde edildiği birer karışım referans karışım olarak seçilmiştir.

İkinci aşamada, ilk aşamada seçilen referans karışımlara alüminosilikat ağırlığınca %1, 2 ve 5 oranında akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmış ve katkıların yayılma çapı, priz süresi ile mekanik özellikler ve yüksek sıcaklık direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Son aşamada ise, ikinci aşamada üretilen karışımlar arasından seçilenler, aynı miktarda su içeren ancak akışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlarla kıyaslanmıştır. Bu kapsamda reometre, XRD, SEM/EDS, temas açısı ve yüzey gerilimi incelemeleri ile katkıların kristal yapı, reoloji, içyapı ve morfoloji üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiştir.

6.1 Materyal

6.1.1 Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu

Çalışmada alüminosilikat olarak İzmir/Aliağa'da faaliyet gösteren İzdemir Enerji Elektrik Üretim A.Ş.'ye ait termik santralden temin edilen F sınıfı uçucu kül ve Kardemir Demir Çelik Fabrikası'ndan temin edilen yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Alüminosilikatların üreticisinden alınan kimyasal bileşimleri ile bazı fiziksel özellikleri Tablo 6.1'de sunulmuştur.

Tablo 6.1 Alüminosilikatların kimyasal bileşimi ve bazı fiziksel özellikleri.

Bileşen	F sınıfı uçucu kül (ağırlıkça %)	Yüksek fırın cürufu (ağırlıkça %)
Kızdırma kaybı	4.46	0.12
SiO ₂	53.45	31.3
Al ₂ O ₃	20.63	8.01
CaO	4.93	49.4
Fe ₂ O ₃	9.79	2.27
MgO	1.95	4.08
SO ₃	0.19	1.18
Na ₂ O	1.12	0.30
K ₂ O	2.07	1.18
P ₂ O ₅	0.86	1.56
Cl	0.0234	0.022
Özgül ağırlık	2.32	3.05
Fiziksel özellikler		
Blaine özgül yüzey alanı (cm ² /g)	5253	5120
45 µm üstü bakiye (%)	15.5	0.3

6.1.2 Alkali aktivatör

6.1.2.1 Sodyum silikat

Kullanılan sodyum silikat Manisa ilinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilmiş olup çözelti formundadır. Sodyum silikata ait bazı özellikler üretici firmadan temin edilmiş ve Tablo 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.2 Sodyum silikata ait bazı özellikler.

Özellik	Değer
Görünüm	Renksiz Sıvı
Yoğunluk	1.38 g/cm ³
Na ₂ O (% Küttele)	11.32
SiO ₂ (% Küttele)	28.22
SiO ₂ /Na ₂ O (Modül)	2.5

6.1.2.2 Sodyum hidroksit

Çalışmada Bursa ilinde üretim yapan bir firmadan %98 saflık oranında, pelet şeklindeki sodyum hidroksit kullanılmıştır.

6.1.3 Akışkanlaştırıcı katkıları

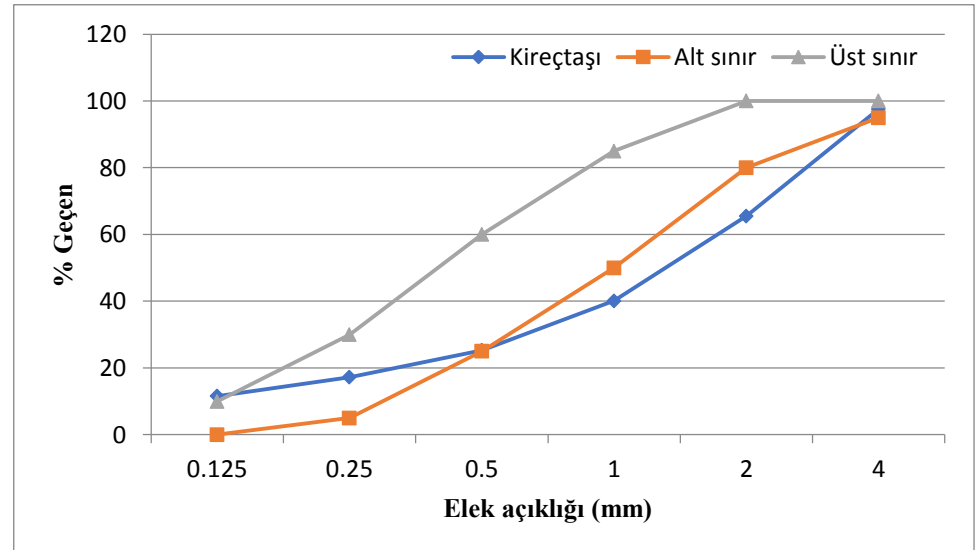
Çalışmada iki farklı firmadan temin edilen, farklı kimyasal özelliklere sahip 7 adet katkı kullanılmıştır. Bu katkıları lignin, melamin sülfonat, naftalin, naftalin vinil, polikarboksilat ve polikarboksilat eter esaslı olup katkıların bazı özellikleri üretici firmalardan temin edilmiş ve Tablo 6.3’de gösterilmiştir

Tablo 6.3 Akışkanlaştırıcı katkıların bazı özellikleri ve çalışmada kullanılan kısaltmaları.

Katkının esası	Çalışmadaki kısaltma	Firma	Su İçeriği (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	pH
Lignin	L	A	55-60	1.17	6.08
Naftalin	N	A	45	1.19	6.25
Naftalin vinil	Nv	A	70	1.20	7.50
Melamin sülfonat	M	A	45	1.16	5.95
Polikarboksilat eter	P1	A	45	1.07	5.00
Polikarboksilat	P2	A	45	1.05	4.00
Polikarboksilat eter	P3	B	64	1.08	6.00

6.1.4 Agrega

Çalışmada gradasyonu Şekil 6.1’de gösterilen; özgül ağırlığı 2.65, su emme kapasitesi % 1.0 olan kireçtaşı kırma kumu kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Kullanılan kireçtaşı için gradasyon (ASTM C33, 2018).

6.1.5 Su

Çalışma kapsamında kullanılan su İzmir ili, Bornova İlçesi şehir şebekesi suyudur.

6.2 Metod

6.2.1 Aktivatör karışımının hazırlanması

Çalışmanın ilk aşamasında M_s oranının geopolimer özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda sodyum hidroksit peletleri, sodyum silikat çözeltisinde karıştırma yöntemiyle çözdürülmüş ve üç farklı M_s oranına (1.25, 1.50, 1.75) sahip aktivatör çözeltisi üretilmiştir. Bu çözeltiler, çözeltiden karışıma girecek Na_2O miktarı, alüminosilikat ağırlığınca %5, 7.5 ve 10 olacak şekilde ayarlanmış ve farklı karışımlar elde edilmiştir. Oluşturulan çözelti ortam şartlarında 24 saat dinlendirildikten sonra kullanılmıştır.

6.2.2 Harçların hazırlanması

Harçların hazırlanmasında Hobart harç karıştırıcısı kullanılmıştır. Tartma işlemleri 0.1 g hassasiyetli tartıda yapılmış; sırasıyla kum, alüminosilikat, aktivatör, varsa su ve akışkanlaştırıcı katkı mikser haznesine koyulmuştur. Su ve akışkanlaştırıcı katkının beraber kullanıldığı karışımlarda katkı, su ile karıştırıldıktan sonra hazneye eklenmiştir. Tüm malzemeler kaba koyulduktan sonra yaklaşık olarak 5-10 saniye kaşık yardımı ile elle karıştırma yapılmış devamında mikser 90 saniye düşük hızda çalıştırılmıştır. Kabın çeperine yapışan malzemeler bir kaşık yardımıyla yaklaşık olarak 10 saniyede sıyrıldıktan sonra mikser 90 saniye yüksek hızda çalıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra harçların yayılma çapları belirlenmiş, devamında karışımlar 40x40x160 mm ebatlı prizma metal kalıplara iki tabakada yerleştirilmiş, her tabaka sarsma tablasında 25 defa düşürülerek sıkıştırılmıştır. Yüzeyi spatula ile düzeltilen numuneler bekletilmeksizin etüve yerleştirilmiştir.

Numuneler kalıpları ile birlikte 60°C'deki etüvde 3 gün boyunca kürlenmiş, kür süresi biten numuneler etüvden alınmış ve oda sıcaklığına soğuyana kadar laboratuvar ortamında bekletilerek sertleşmiş hal deneylerine geçilmiştir.

Farklı M_s oranları ve Na_2O yüzdeleri ile çalışıldığından kıyaslama yapılabilmesi amacıyla yayılma çapları sabitlenmiştir. İşlenebilir bir karışım elde edilebilmesi için yayılma çapı hedefi 17.5 ± 1 cm olarak belirlenmiş ve hedefin sağlanabilmesi için bazı karışımlara su ilavesi yapılmıştır.

6.2.3 Yayılma çaplarının tespiti

Harç karışımlarının yayılma çapları ASTM C1437-20 (2020) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Harç karışımı, kesik koniye iki tabaka halinde yerleştirilmiş, her tabaka 20 defa tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır. Devamında koni kaldırılmış ve 15 saniyede 25 düşüş yapılarak birbirine dik iki doğrultudaki yayılma çapı değeri ölçülmüştür. Bu iki değer ortalama yayılma çapı olarak kaydedilmiştir. Çalışma kapsamında uçucu kül esaslı bir karışımın yayılma çapının ölçümü Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Yayılma çapının tespiti.

6.2.4 Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımları, ASTM C348-21 standardı baz alınarak tespit edilmiştir. Deneyde kullanılan hidrolik presin kapasitesi 10 ton, mesnet açıklığı

100 mm olup üç noktalı yükleme yapılmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı Denklem 6.1 yardımıyla hesaplanmış ve 3 adet numunenin ortalaması eğilme dayanımı olarak kaydedilmiştir. Deney anına ait bir görüntü Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Eğilme dayanımı test cihazı.

$$\text{Eğilme Dayanımı} = \frac{M.c}{I} = \frac{3PL}{2bh^2} (\text{MPa})$$

Denklem 6.1

Bu denklemde;

P, Maksimum yükü (N)

M, Maksimum momenti (N.mm)

c, Tarafsız eksen ile kiriş yüksekliği arasındaki uzaklığı (mm)

I, Atalet momentini (mm⁴)

L, Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesini (mm)

b, Deney numunesinin genişliğini (mm)

h, Deney numunesinin yüksekliği (mm) ifade etmektedir.

6.2.5 Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri ASTM C349-18 standardı baz alınarak 2000 kN kapasiteli beton presinde gerçekleştirilmiştir. Numune olarak eğilme dayanımı

deneyinde kullanılan 40x40x160 mm ebatlarındaki prizmadan arta kalan parçalar kullanılmış olup 6 adet numunenin ortalaması basınç dayanımı değeri olarak kaydedilmiştir. Deney anına ait bir görsel Şekil 6.4’de sunulmuştur. Basınç dayanımının hesaplanmasında ise Denklem 6.2 kullanılmıştır.

$$\text{Basınç dayanımı} = \frac{P}{A} \text{ (MPa)}$$

Denklem 6.2

Bu denklemde;

P, Maksimum yükü (N),

A, Numunenin kesit alanını (mm²) ifade etmektedir.



Şekil 6.4 Basınç dayanımı deneyinin düzeneği.

6.2.6 Yüksek sıcaklık direnci

Yüksek sıcaklık deneyinde, 3 günlük kürünü tamamlayıp oda sıcaklığına soğumuş olan 40x40x160 mm ebatlarındaki numuneler kullanılmıştır. Deneyler 1175°C kapasiteye sahip laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. Hedef sıcaklıklar 600, 800, 1000°C, fırının sıcaklık artış hızı 10°C/dakika, hedef sıcaklığa ulaşıldıktan sonraki bekletme süresi ise 180 dakika olarak seçilmiştir. Deney süresi sonunda numuneler kapağı kapalı fırının içinde soğumaya bırakılmış, yaklaşık olarak 24 saat sonra oda sıcaklığına soğuyan

numuneler bekletilmeden mekanik deneylere geçilmiştir. Yüksek sıcaklık fırını ve numunelerin fırın içinde dizilimi Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5 Yüksek sıcaklık fırını ve numunelerin dizilimi.

6.2.7 SEM/EDS analizi

SEM/EDS incelemeleri Ege Üniversitesi Merkez Araştırma ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde 'Thermo Scientific Apreo S' marka ve model cihaz kullanılarak 5.0-7.5 kV aralığında yapılmıştır. İncelemeler hamur numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olup analizden önce numuneler 'Leica EM ACE600' marka ve model cihaz ile 7 nm kalınlığında altın-paladyum ince filmiyle (%80-20) kaplanmıştır. EDS incelemesi, hamurda seçilen noktalar üzerinde uygulanmış olup elementlerin seçilen noktada bulunma yüzdeleri tespit edilmiştir. Numunelerin SEM/EDS cihazına yerleştirilmesi Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 Numuneler'in SEM/EDS test cihazına yerleştirilmesi.

6.2.8 XRD analizi

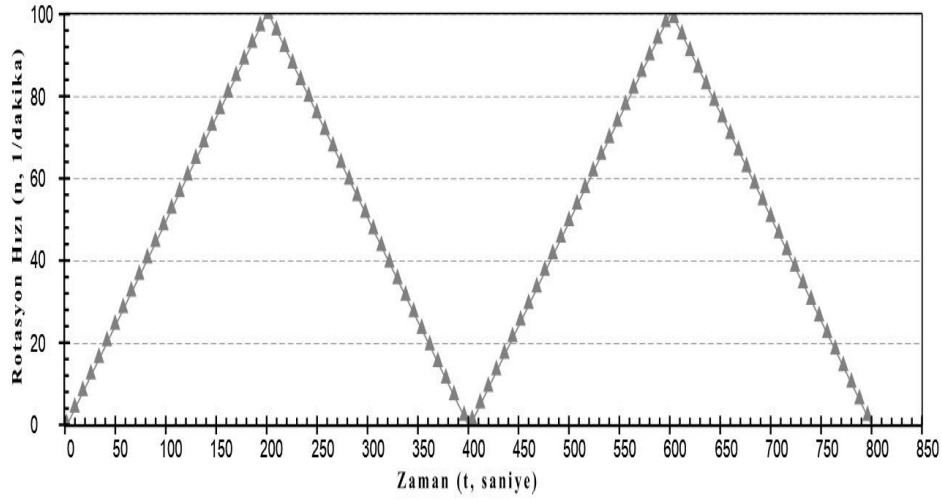
Farklı alüminosilikat ve katkılarla elde edilen numunelerin kristal yapılarının incelenebilmesi amacıyla XRD analizi yapılmıştır. XRD analizleri, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde 'Panalytical Empyrean' adlı cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İncelemeler, toz haline getirilen hamur numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler 0.0130° adım aralığında $5-80^\circ 2\theta$ arasında Cu-K α ($1,54\text{\AA}$), Cu-K β ($1,39\text{\AA}$) anot kullanılarak analiz edilmiştir. Dedektörün çarpma yüksekliği analizörü 4,02-11,26 keV aralığında tutulmuştur.

6.2.9 Reolojik analiz

Reoloji analizleri "Anton Paar MCR102e" marka ve model modüler kompakt reometre cihazında yapılmıştır. Ölçümlerde, rotasyonel hız 0.1-100 rpm aralığında artan ve azalan hızda 4 adımda gerçekleştirilmiştir. Ölçümün hız-zaman grafiği Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Kayma her adımda 100 noktada lineer veri alacak ve her ölçüm noktasının uzunluğu 2 saniye olacak biçimde Şekil 6.7'de gösterilen ST59 karıştırma ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her adımın sonunda ucun dönme yönü değiştirilmiştir.



Şekil 6.7 Reometre ve kullanılan uç.



Şekil 6.8 (0.1-100 rpm) aralığında kullanılan patern.

6.2.10 Temas açısı

Temas açısı analizi sertleşmiş hamur numune üzerine su damlası damlatılarak, katı numune yüzeyi ile su arasındaki açının incelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu açının vermiş olduğu değere göre katı malzemede hidrofobi, hidrofili veya amfifil yorumlarının yapılması mümkündür. Temas açısı

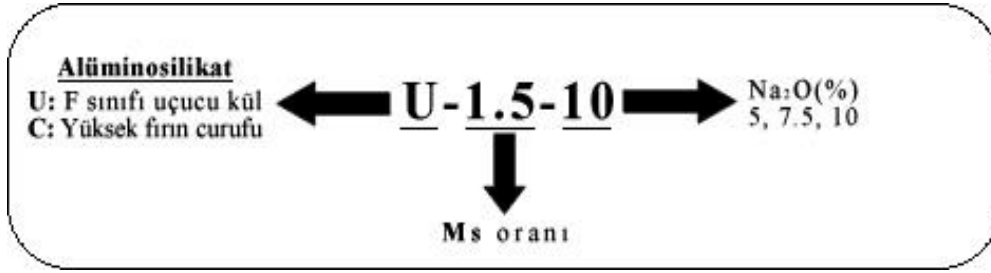
ve yüzey gerilimi için ‘Attension Theta’ kamera sistemi kullanılmıştır. Cihaz 3009 fps kapasitesine sahiptir. Temas açısı ölçümü 0-180° aralığında ve $\pm 0,1^\circ$ ölçüm hassasiyetinde yapılmıştır. Yüzey gerilimi ölçüm aralığı ve ölçüm hassasiyeti ise sırasıyla 0,01-2000 mN/m ve $\pm 0,1^\circ$ ’dir.

6.2.11 Priz süresi tayini

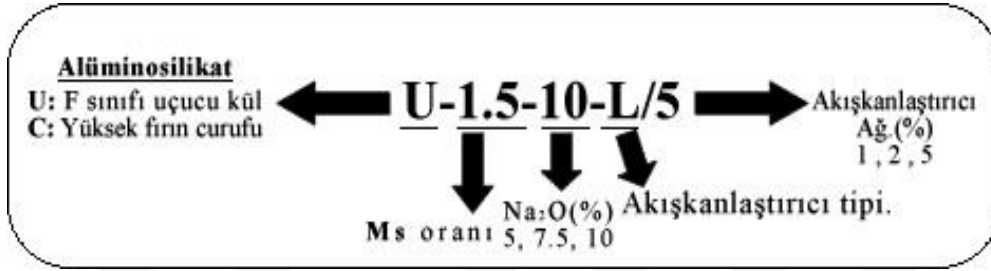
Priz süresi ölçümleri Vicat aleti yardımıyla ASTM C 191-21 baz alınarak yapılmıştır. Priz süreleri ölçülürken hamur numuneler hazırlanmış ve Vicat halkasına yerleştirilmiştir. Devamında halka 60°C sıcaklığa ayarlanmış olan etüve yerleştirilmiştir. Belirli sürelerle halka etüvden çıkarılmış, ölçüm hızlıca yapılmış ve halka tekrar etüve koyulmuştur.

6.2.12 Kodlama

Çalışmada farklı alüminosilikat, farklı M_s ve Na_2O oranları ve farklı katkıların kullanılması nedeniyle bunların tamamını içeren bir kodlamanın yapılması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda akışkanlaştırıcı katkı içermeyen karışımlara dair kodlama Şekil 6.9’da, akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlara dair kodlama ise Şekil 6.10’da sunulmuştur.



Şekil 6.9 Katkı içermeyen karışımlarda kullanılan kodlama.



Şekil 6.10 Katkı içeren karışımlarda kullanılan kodlama.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

7.1 Referans Harç Karışımının Belirlenmesi

7.1.1 Karışım tasarımı

Tablo 7.1’de çalışma kapsamında üretilen ve referans karışımların tespit edilmesinde kullanılan harçlara ait malzeme miktarları, yayılma çapları ve taze birim hacim ağırlık (BHA) değerleri sunulmuştur. Hedef yayılma çapı olan 17 ± 1 cm’nin sağlanabilmesi için karışımların birçoğuna su ilavesi yapılmıştır. Ancak U-1.5-10 kodlu karışımda su ilavesi yapılmadan hedef yayılma çapına ulaşılmışken C-1.75-10 kodlu karışımda sadece aktivatör çözeltisi bünyesinde bulunan su ile hedef yayılma çapından daha yüksek bir yayılma çapı elde edilmiştir. Aynı M_s oranı ve Na_2O yüzdesi kullanılarak üretilen uçucu kül ve cüruf esaslı karışımlar kıyaslandığında, hedef yayılma çapının elde edilebilmesi için cüruf esaslı karışımlarda daha fazla su kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Bunun, uçucu kül tanelerinin çoğunluğunun küresel yapıda olması ancak cüruf parçacıklarının düzensiz ve köşeli tanelerden oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

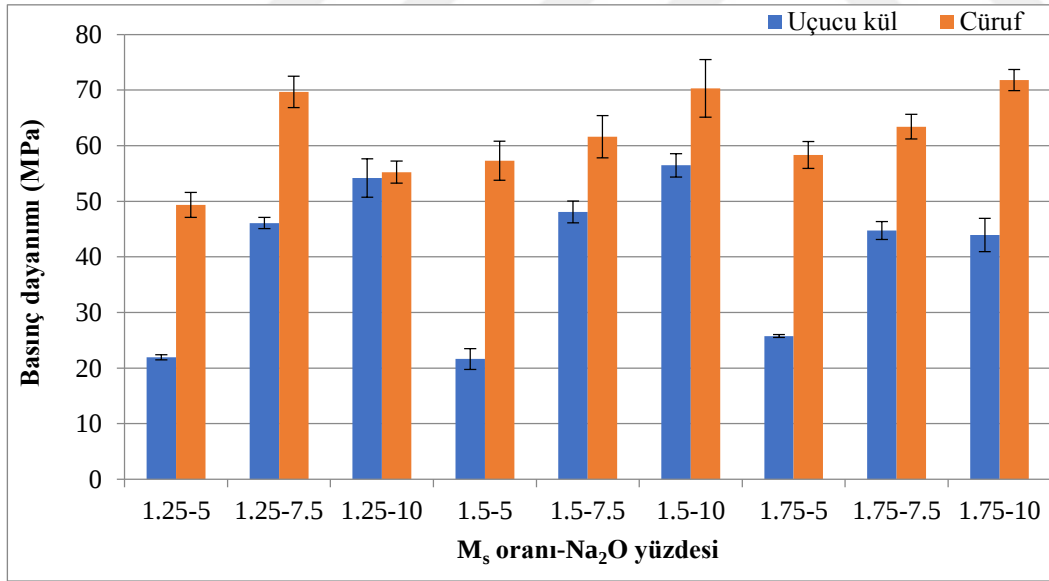
Tablo 7.1 Referans karışımların tespitinde kullanılan harç karışımları.

Alümino-silikat	M_s	Na_2O (%)	Kodlama	Alümino-silikat (g)	Aktivatör (g)	Su (g)	Kum (g)	Yayılma çapı (cm)	Taze BHA (kg/m^3)
UK	1.25	5	U-1.25-5	450	114.1	75	1250	17	2463.6
UK	1.25	7.5	U-1.25-7.5	450	171.3	47	1250	18	2505.5
UK	1.25	10	U-1.25-10	450	227.4	50	1250	17.3	2579.9
UK	1.50	5	U-1.50-5	450	131.1	65	1250	17.5	2474.0
UK	1.50	7.5	U-1.50-7.5	50	196.8	25	1250	17	2507.5
UK	1.50	10	U-1.50-10	450	262.4	0	1250	17.3	2559.2
UK	1.75	5	U-1.75-5	450	131.1	45	1250	18	2467.7
UK	1.75	7.5	U-1.75-7.5	450	222.4	10	1250	17	2521.3
UK	1.75	10	U-1.75-10	450	296.5	0	1250	20.3	2603.5
YFC	1.25	5	C-1.25-5	450	114.1	150	1250	17.8	2298.4
YFC	1.25	7.5	C-1.25-7.5	450	171.3	88.5	1250	18	2376.0
YFC	1.25	10	C-1.25-10	450	227.4	90	1250	17.3	2340.5
YFC	1.50	5	C-1.50-5	450	131.1	120	1250	17.2	2319.3
YFC	1.50	7.5	C-1.50-7.5	450	196.8	70	1250	17.5	2325.0
YFC	1.50	10	C-1.50-10	450	262.4	30.5	1250	17.5	2365.6
YFC	1.75	5	C-1.75-5	450	131.1	100	1250	18	2301.0
YFC	1.75	7.5	C-1.75-7.5	450	222.4	45	1250	17.3	2295.3
YFC	1.75	10	C-1.75-10	450	296.5	15	1250	17.3	2332.2

7.1.2 Basınç ve eğilme dayanımı sonuçları

Referans karışımların belirlenebilmesi amacı ile üretilen uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı harçların basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Referans karışımların seçilmesi için üretilen harçların basınç dayanımları incelendiğinde tüm M_s oranları ve Na_2O içeriklerinde, yüksek fırın cürufu esaslı harçların basınç dayanımlarının uçucu kül esaslı harçlardan yüksek olduğu görülmektedir. Her iki alüminosilikatla üretilen harçlarda da genel eğilim aynı M_s oranında Na_2O oranının artmasıyla, basınç dayanımların artması şeklindedir. Bu durumun artan Na_2O miktarı ile alüminosilikatın çözünürlüğünün yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu kül esaslı harçlarda en yüksek basınç dayanımı 1.5 M_s oranı ve %10 Na_2O içeriğinde 56.5 MPa ile elde edilmiştir. Yüksek fırın cürufunda ise 1.75 M_s oranı ve %10 Na_2O içeriğine sahip karışım 71.8 MPa ile en yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır.

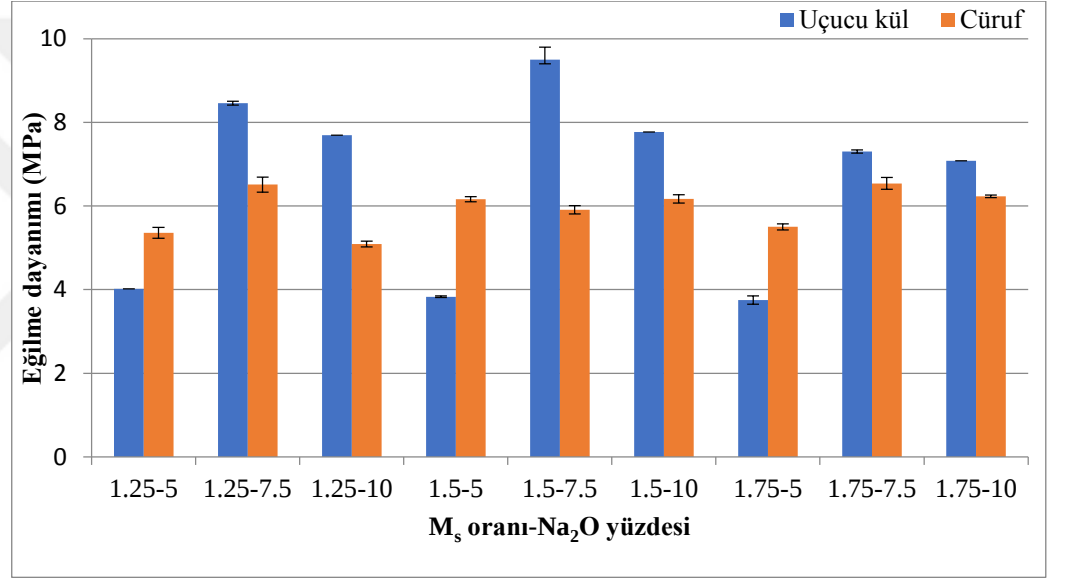


Şekil 7.1 Akışkanlaştırıcı katkı içermeyen geopolimer harçların basınç dayanımları.

Karışımların eğilme dayanımları incelendiğinde sonuçların basınç dayanımı ile tam olarak paralellik taşımadığı tespit edilmiştir. Eğilme dayanımında her iki alüminosilikat ile de hazırlanan harçlarda genel eğilim aynı M_s oranında Na_2O içeriğinin artışıyla dayanımlarda önce artış, 7.5 değerinden sonra ise azalış

görülmesi şeklindedir. Bunun nedeninin eğilme dayanımının basınç dayanımından farklı olarak arayüzeye daha fazla bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı harçlarda en yüksek eğilme dayanımına sahip karışımların sırasıyla U-1.5-7.5 ve C-1.75-7.5/C-1.25-7.5 olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde üretilen ve en yüksek basınç dayanımlarının elde edilmesini sağlayan U-1.5-10 ve C-1.75-10 kodlu karışımlar referans olarak seçilmiş olup sonraki aşamada katkı ilavesinin bu karışımların taze ve sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkisi incelenecektir.



Şekil 7.2 Katkısız oluşturulan karışımların eğilme dayanımı.

7.2 Akışkanlaştırıcı Katkı İçeren Karışımlar

7.2.1 Karışım tasarımı

Farklı tür ve dozajdaki akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak üretilen harç karışımlarının, karışım oran, yayılma çapı ve taze BHA değerleri Tablo 7.2’de gösterilmiştir. 7 adet katkı 3 farklı dozajda kullanılmış olup toplamda 42 farklı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu esaslı harç üretilmiştir. Katkı ilavesi ile bazı karışımlarda yayılma çaplarının referans karışıma kıyasla yükseldiği, bazı karışımlarda ise bu durumun tam tersinin geçerli olduğu tespit edilmiştir. Yayılma

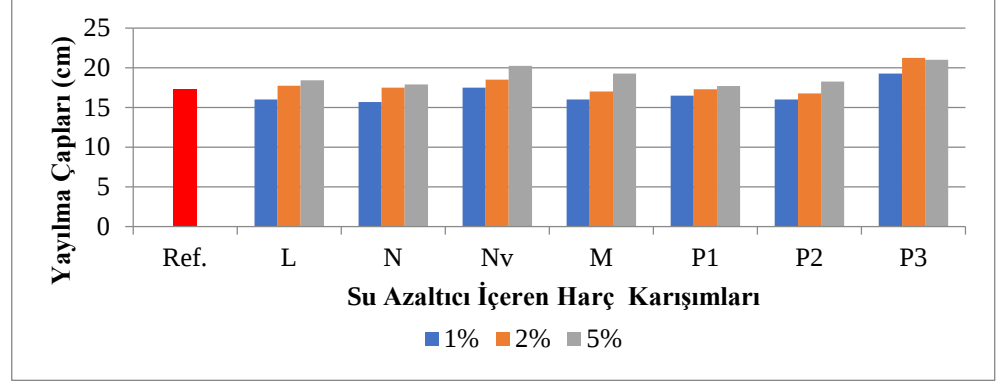
çaplarındaki artışın akışkanlaştırıcı katkıdan gelen suyun etkisinden kaynaklandığı, azalışların ise muhtemelen düşük pH'a sahip katkının bazik ortamda çöküp tuz oluşturmamasından ileri geldiği tahmin edilmektedir. Aynı tipteki katkı ilavesinde, katkı miktarındaki artış ile yayılma çaplarının genellikle arttığı görülmüş olup bunun da katkıda bulunan sudan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 7.2 Akışkanlaştırıcı katkı içeren karışımlara ait karışım oranları ve bazı özellikleri.

Kod	Katkı		Yayılma çapı (cm)	Taze BHA (kg/m ³)	Kod	Katkı		Yayılma çapı (cm)	Taze BHA (kg/m ³)
	%	g				%	g		
U-1.50-10	-	-	17.3	2324.8	C-1.75-10	-	-	17.3	2332.2
U-1.50-10-L/1	1	4.5	16	2266.3	C-1.75-10-L/1	1	4.5	16.3	2301.6
U-1.50-10-L/2	2	9.0	17.8	2280.7	C-1.75-10-L/2	2	9.0	17.5	2350.6
U-1.50-10-L/5	5	22.5	18.4	2245.2	C-1.75-10-L/5	5	22.5	19.25	2364.6
U-1.50-10-N/1	1	4.5	15.7	2266.4	C-1.75-10-N/1	1	4.5	17	2361.6
U-1.50-10-N/2	2	9.0	17.5	2217.5	C-1.75-10-N/2	2	9.0	17.4	2401.0
U-1.50-10-N/5	5	22.5	17.9	2134.5	C-1.75-10-N/5	5	22.5	19.2	2331.0
U-1.50-10-Nv/1	1	4.5	17.5	2265.5	C-1.75-10-Nv/1	1	4.5	17.4	2291.6
U-1.50-10-Nv/2	2	9.0	18.5	2217.4	C-1.75-10-Nv/2	2	9.0	17.2	2390.2
U-1.50-10-Nv/5	5	22.5	20.3	2134.5	C-1.75-10-Nv/5	5	22.5	20.5	2352.5
U-1.50-10-M/1	1	4.5	16	2246.2	C-1.75-10-M/1	1	4.5	16.5	2355.2
U-1.50-10-M/2	2	9.0	17	2255.3	C-1.75-10-M/2	2	9.0	18.2	2341.4
U-1.50-10-M/5	5	22.5	19.3	2254.3	C-1.75-10-M/5	5	22.5	18.6	2347.0
U-1.50-10-P1/1	1	4.5	16.5	2303.8	C-1.75-10-P1/1	1	4.5	15.5	2375.6
U-1.50-10-P1/2	2	9.0	17.3	2310.3	C-1.75-10-P1/2	2	9.0	17.75	2359.8
U-1.50-10-P1/5	5	22.5	17.7	2298.0	C-1.75-10-P1/5	5	22.5	17.25	2324.3
U-1.50-10-P2/1	1	4.5	16	2279.8	C-1.75-10-P2/1	1	4.5	16.25	2367.0
U-1.50-10-P2/2	2	9.0	16.8	2287.2	C-1.75-10-P2/2	2	9.0	16.8	2356.8
U-1.50-10-P2/5	5	22.5	18.3	2265.2	C-1.75-10-P2/5	5	22.5	16.4	2347.9
U-1.50-10-P3/1	1	4.5	19.3	2299.5	C-1.75-10-P3/1	1	4.5	17.5	2350.9
U-1.50-10-P3/2	2	9.0	21.3	2341.4	C-1.75-10-P3/2	2	9.0	18.5	2357.3
U-1.50-10-P3/5	5	22.5	21.00	2311.3	C-1.75-10-P3/5	5	22.5	19.5	2350.2

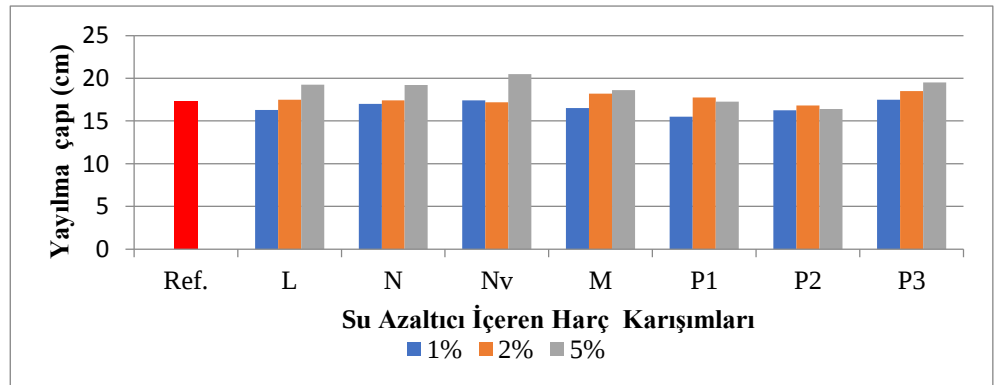
Akışkanlaştırıcı katkı içeren uçucu kül esaslı harç karışımların yayılma çapları Şekil 7.3'de gösterilmiştir. %1 katkı dozajında en yüksek yayılma çapı değerine naftalin vinil (Nv) ve polikarboksilat eter (P3) ile ulaşıldığı tespit edilmiştir. Akışkanlaştırıcı dozajının %2'ye çıkarılmasıyla melamin sülfonat (M) ve polikarboksilat (P2) katkılarının yayılma çapını düşürdüğü, en yüksek yayılma çapına ise polikarboksilat eter (P3) kullanılan harçta ulaşıldığı belirlenmiştir.

Dozajın %5'e çıkarılmasıyla birlikte katkıdan gelen su miktarının da ciddi biçimde artmasıyla tüm katkılar yayılma çapının artmasına neden olmuştur.



Şekil 7.3 Katkı içeren uçucu kül esaslı karışımların yayılma çapları.

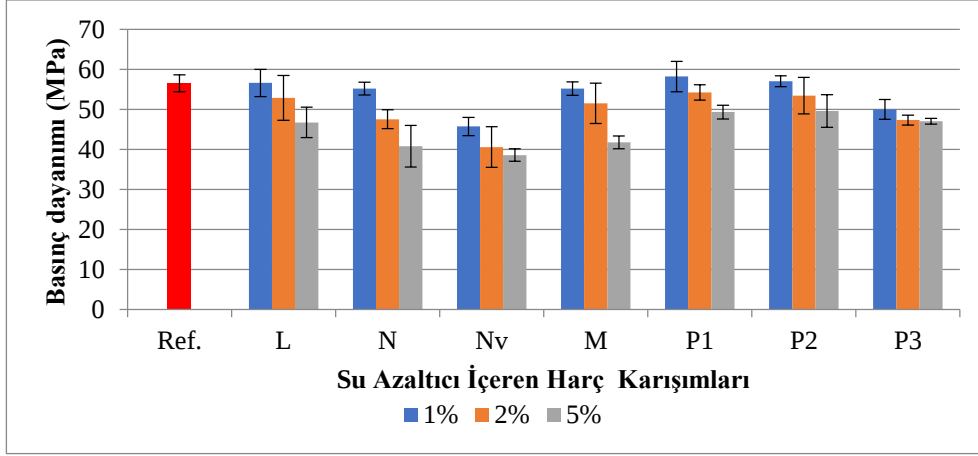
Şekil 7.4'te akışkanlaştırıcı katkıların YFC esaslı harçların yayılma çapı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Buna göre %1 katkı dozajında naftalin vinil (Nv) ve polikarboksilat eter (P3), C-1.75-10 kodlu referans karışıma çok yakın bir yayılma çapı elde edilmesini sağlamıştır. Katkı dozajının %2'ye yükseltilmesiyle birlikte yayılma çaplarında bir miktar artış elde edilmiştir. %5 katkı dozajında da benzer şekilde yayılma çaplarında artış görülmüşken en yüksek yayılma çapı naftalin vinil (Nv) esaslı katkı ile elde edilmiştir. Bu katkının kullanıldığı karışımın, referans karışımdan %17.34 oranında daha yüksek yayılma çapına ulaştığı da görülmektedir. Tüm katkıların aynı dozajda kullanıldığı ve katkılar içerisinde en yüksek miktarda su içerenin de naftalin vinil (Nv) esaslı olması, önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere yayılma çapındaki artışın katkının etkinliğinden ziyade su içeriğinden kaynaklandığını kanıtlamaktadır.



Şekil 7.4 Katkı içeren cüruf esaslı karışımların yayılma çapları.

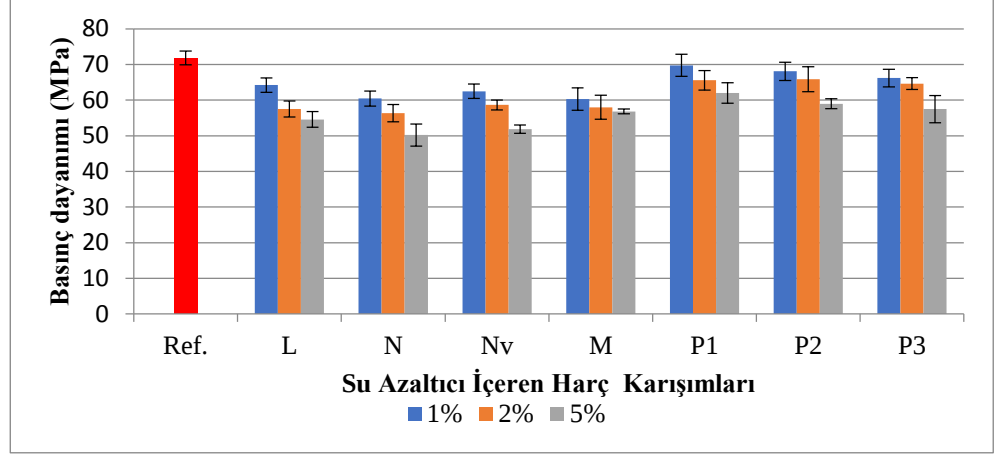
7.2.2 Basınç ve eğilme dayanımları

Farklı dozajlarda akışkanlaştırıcı katkı içeren F sınıfı uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımları Şekil 7.5’de gösterilmiştir. Katkı ilavesi ile genel eğilim basınç dayanımlarının azalması şeklindedir. Aynı katkı türünde, katkı miktarının artması ile basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiş olup bunun daha önce de bahsedildiği üzere karışımdaki su miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Polikarboksilat eter (P1) kodlu katkıyı içeren harcın basınç dayanımının %1 dozajında kontrol karışımından bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. Basınç dayanımının en fazla azaldığı karışım ise %5 dozajında naftalin vinil (Nv) içeren karışımdır.



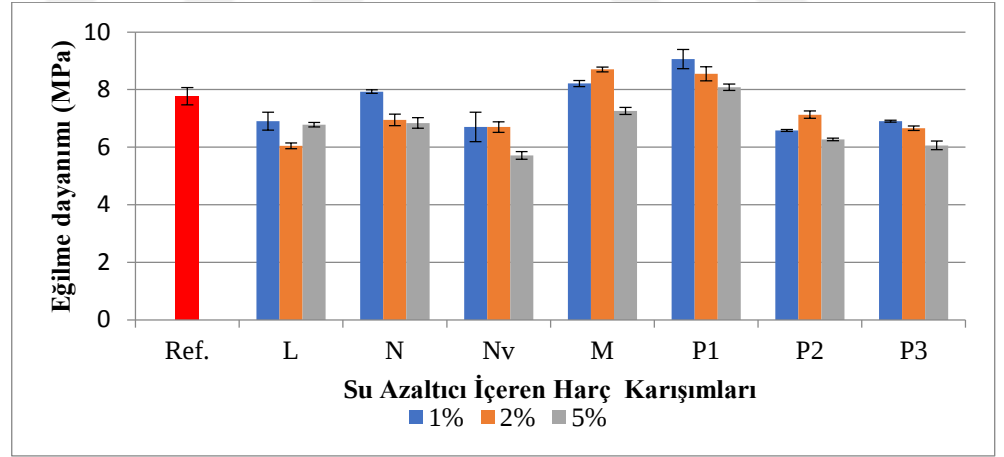
Şekil 7.5 Katkı içeren uçucu kül esaslı harçların basınç dayanımları.

Şekil 7.6’da akışkanlaştırıcı katkı içeren YFC esaslı harçlara ait basınç dayanımları sunulmuştur. %1 dozajında polikarboksilat (P1) esaslı katkı içeren karışımın basınç dayanımının referans karışıma en yakın olmuştur. Yüksek su içeriğine sahip katkıların yüksek dozajlarda kullanılmasının, referans karışıma kıyasla basınç dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Katkı içeren karışımlar arasında en düşük basınç dayanımına %5 dozajında naftalin (N) ilavesi ile ulaşılmıştır.



Şekil 7.6 Katkı içeren cüruf esaslı harçların basınç dayanımları.

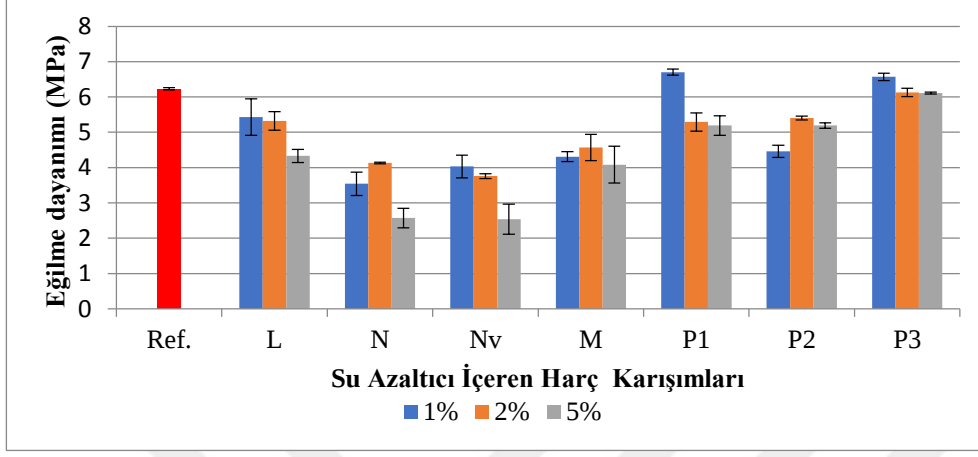
Şekil 7.7 ve 7.8’de katkı içeren uçucu kül ve cüruf esaslı harçların eğilme dayanımları gösterilmiştir. Uçucu kül esaslı karışımlarda %1 dozajda naftalin (N), melamin sülfonat (M) ve polikarboksilat eter (P1) esaslı katkıları içeren harçların eğilme dayanımlarının referans karışımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tüm katkı dozajı ve türlerinde en yüksek eğilme dayanımına sahip karışımın %1 polikarboksilat eter (P1) içeren karışım olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.7 Katkı içeren uçucu kül esaslı harçların eğilme dayanımları.

Şekil 7.8 incelendiğinde, %1 katkı dozajında yalnızca polikarboksilat eter (P1 ve P3) katkılarını içeren karışımların referans karışımından daha yüksek eğilme dayanımına ulaştığı görülmektedir. Basınç dayanımına benzer şekilde katkı dozajı arttıkça, katkıların eğilme dayanımlarının genel olarak düştüğü de tespit edilmiştir.

Katkı dozajının artmasıyla polikarboksilat eter (P3) içeren karışımın eğilme dayanımı kayda değer mertebede değişmediği ve tüm dozajlarda benzer bir eğilme dayanımı elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7.8 Katkı içeren cüruf esaslı harçların eğilme dayanımları.

7.3 Su Miktarlarının Eşitlenmesi

7.3.1 Karışım tasarımı ve basınç dayanımı

Bölüm 7.2’de elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, referans harç karışımına akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmesinin yayılma çapları üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu görülmektedir. Ancak her ne kadar yayılma çaplarında artış görülse de katkıların tamamının süspansiyon formunda olduğu ve önemli miktarda su içerdiklerinin görmezden gelinmesi mümkün değildir. Bu bölümde her katkı için, kullanım dozajına göre katkı içerisindeki su miktarları belirlenmiş ve referans karışıma, bu miktarlarda su ilavesi yapılarak yayılma çaplarındaki artışın su etkisinden kaynaklanıp kaynaklanmadığı araştırılmıştır. Bu kapsamda üretilen ve toplam su miktarları aynı olan harçlara ait detaylar Tablo 7.3 ve 7.4’de sunulmuştur. Tablolarda kontrol karışımına, katkıdan gelen miktarda su eklenmesi ile üretilen harçlara “Ref” ismi verilmiş olup her yeni referans karışımın yayılma çapı ve basınç dayanımına etkisi aynı miktarda su içerdiği katkılı karışım ile kıyaslanmıştır.

Tablo 7.3 Uçucu kül esaslı harçlarda su içeriğinin dayanım ve yayılma çapına etkisi

Kod	İlave Su (g)	Katkıdan gelen su (g)	Toplam su (g)	BHA (kg/m ³)	Yayılma çapı (cm)	Yayılma çapı değişimi (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı değişimi (%)
U-1.50-10 (U-Ref1)	-	-	-	2332.2	17.2	-	56.5	-
U-1.50-10-L/5 U-Ref2	- 12.4	12.4 -	12.4 12.4	2364.6 2326.3	18.4 20.3	10.76	46.7 51.4	8.57
U-1.50-10-M/5 U-Ref3	- 10.1	10.1 -	10.1 10.1	2347.0 2316.0	19.3 20.0	4.36	41.7 57.3	19.58
U-1.50-10-Nv/5 U-Ref4	- 15.8	15.8 -	15.8 15.8	2352.5 2310.9	20.3 20.8	3.2	38.6 53.8	26.97
U-1.50-10-P3/1 U-Ref5	- 3.0	2.9 -	3.0 3.0	2350.9 2283.8	19.3 18.5	-4.36	50.0 58.9	15.31
U-1.50-10-P3/2 U-Ref6	- 5.9	5.8 -	5.9 5.9	2357.3 2318.6	21.3 20.5	-4.36	47.3 57.3	13.93
U-1.50-10-P3/5 U-Ref7	- 14.6	14.4 -	14.6 14.6	2350.2 2350.1	21.0 21.5	2.91	47.0 50.6	6.35

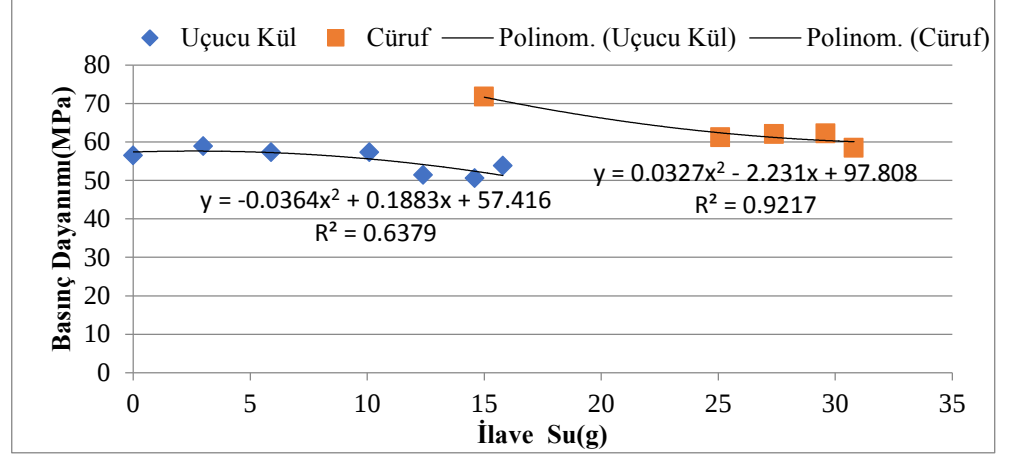
Tabloda görüldüğü üzere katkı yerine, katkıdan sisteme giren suya eşit miktarda suyun karışıma eklenmesi, katkı ilavesinden genellikle daha yüksek yayılma çapı ve basınç dayanımı değerleri elde edilmesini sağlamıştır. Su ve katkı ilave edilen tüm karışımlarda yayılma çapları, kontrol karışımı olan U-1.50-10 karışımından daha yüksek yayılma çaplarının elde edilmesini sağlamıştır. Yalnızca P3 kodlu katkının %1 ve %2 dozajlarındaki kullanımı, aynı miktarda su içeren referans karışımlardan daha yüksek yayılma çapları ile sonuçlanmıştır. Ancak yayılma çapındaki artışın sadece %4.36 olması nedeniyle bunu anlamlı bir veri olarak değerlendirmek zordur. Bu nedenle yayılma çaplarında katkı yerine, katkıda bulunan su içeriği kadar suyun karışıma ilavesinin daha faydalı olduğunun söylenmesi mümkündür. Benzer durum basınç dayanımları için de geçerli olup katkı yerine su kullanılmasının basınç dayanımlarında daha yüksek değerlerin elde edilmesini sağlamaktadır.

Tablo 7.4 YFC esaslı harçlarda su içeriğinin dayanım ve yayılma çapına etkisi.

Kod	İlave su (g)	Katkıdan gelen su (g)	Toplam Su (g)	BHA (kg/m ³)	Yayılma (cm)	Yayılma çapı değişimi (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı değişimi (%)
C-1.75-10 (C-Ref 1)	15	-	15	2332.2	17.3	-	71.8	-
C-1.75-10-L/5 (C-Ref2)	15 27.4	12.4 -	27.4 27.4	2364.6 2384.2	19.3 21.8	14.74	54.6 62.1	6.71
C-1.75-10-N/5 (C-Ref3)	15 25.1	10.1 -	25.1 25.1	2331.0 2392.4	19.2 21.7	14.45	50.5 61.2	14.92
C-1.75-10-Nv/5 (C-Ref4)	15 30.8	15.8 -	30.8 30.8	2352.5 2364.1	20.5 23.0	14.45	51.8 58.5	9.3
C-1.75-10-P3/5 (C-Ref5)	15 29.6	14.4 -	29.6 29.6	2350.2 2350.1	19.5 22.5	17.34	57.5 62.2	6.67

Cüruf esaslı harçlarda da uçucu kül esaslı harçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Katkılı karışımla aynı miktarda su içeren tüm referans karışımlarına ait yayılma çapları ve basınç dayanımları, katkı içeren karışımlardan daha yüksek olmuştur. Ancak YFC esaslı harçlarda, uçucu kül esaslı harçlardan farklı olarak su ilavesinin katkı ilavesine kıyasla çok daha yüksek yayılma çaplarının elde edilmesini sağladığı görülmektedir.

Çimentolu sistemlerde olduğu gibi geopolimer sistemlerle oluşturulan karışımlarda ilave edilen su gözenekliliği direk olarak etkilemektedir. Sabit M_s oranı ve Na_2O yüzdesi olan karışımlara katkıdan gelen miktarda ilave edilen suyun basınç dayanımı ile ilişkisi Şekil 7.9'da gösterilmiştir. Beklendiği gibi ilave edilen su belirli bir sınırın altında olduğunda dayanıma kayda değer zararı olmadığı ancak, yüksek değerlerde olduğunda dayanımı olumsuz etkilediği görülmektedir.



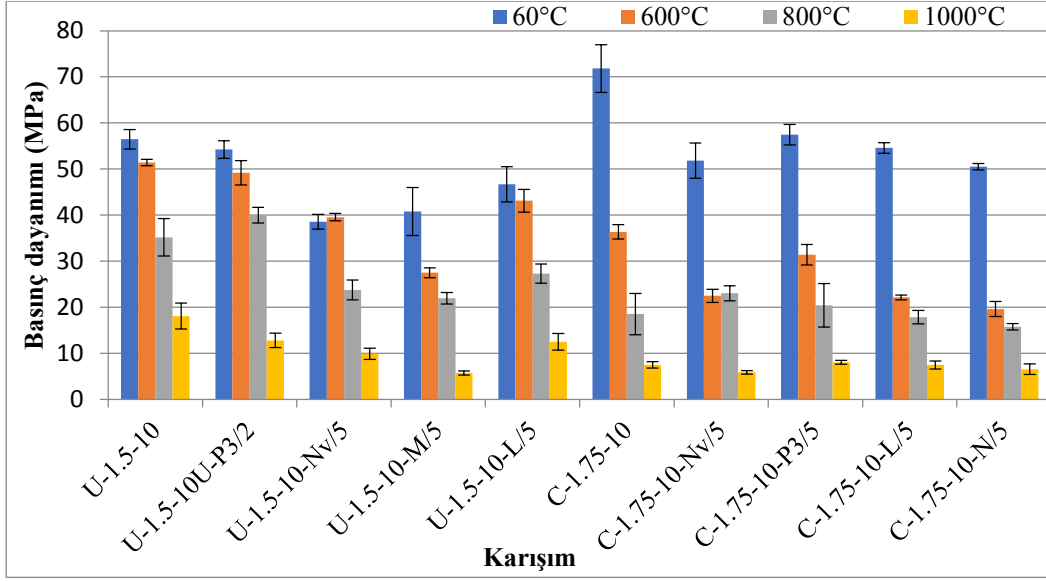
Şekil 7.9 Sabit M_s oranı ve Na_2O yüzdesi olan karışımlara katkıdan gelen miktarda ilave edilen suyun basınç dayanımı ile ilişkisi.

7.4 Yüksek Sıcaklık Direnci

Seçilen akışkanlaştırıcı katkıları kullanılarak üretilen numunelerin 600, 800, 1000°C'ye maruz bırakıldıktan sonraki basınç ve eğilme dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de sunulmuştur.

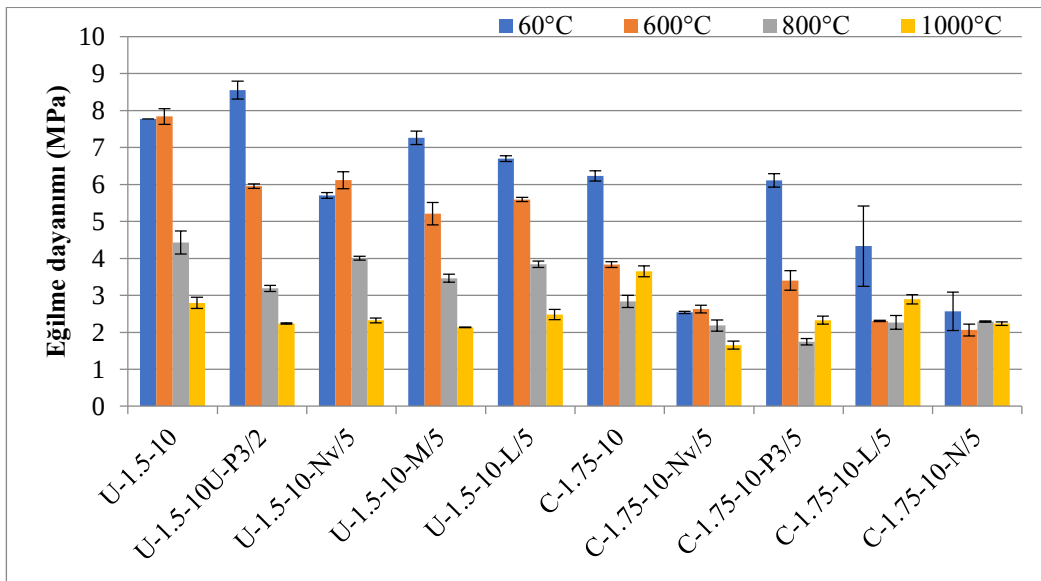
Uçucu kül esaslı karışımların yüksek sıcaklık direnci incelendiğinde her ne kadar sıcaklık arttıkça basınç dayanımlarında kademeli azalışlar olsa da 600°C sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı kayıplarının limitli olduğu görülmüştür. 1000°C sıcaklık etkisi ile referans karışımında %68 oranında dayanım kaybı ortaya çıkmışken bu değer P3/2, Nv/5, M/5, L/5 katkısı içeren karışımlarda %74 ve 86 arasında olduğu belirlenmiştir.

Cüruf esaslı karışımların yüksek sıcaklık etkisindeki basınç dayanımı kayıplarında da benzer bir durum söz konusu olup sıcaklık yükseldikçe basınç dayanımları kademeli olarak azalmıştır. Ancak katkı içersin veya içermesin tüm karışımların basınç dayanımlarının önemli bir bölümünü 600°C etkisi ile kaybettikleri belirlenmiştir. 1000°C etkisi ile referans numune %90, katkı içeren karışımlar ise %86-88 aralığında dayanım kaybına uğramıştır.



Şekil 7.10 Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında basınç dayanımları.

Uçucu kül ve YFC esaslı karışımların yüksek sıcaklık etkisinde yaşadıkları eğilme dayanımı kayıpları Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Uçucu kül esaslı harçların dayanım kayıpları incelendiğinde genel anlamda sıcaklığın artması ile dayanımların kademeli olarak azaldığı görülmüştür. 1000°C sıcaklık etkisi ile referans karışımda %65 oranında dayanım kaybı ortaya çıkmışken bu değer P3/2, Nv/5, M/5, L/5 katkısı içeren karışımlarda %60-74 arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 7.11 Yüksek sıcaklık deneyi sonrasında eğilme dayanımları.

Cüruf esaslı karışımların yüksek sıcaklık etkisindeki eğilme dayanımı kayıpları incelendiğinde dayanım kayıplarının kademeli bir şekilde ilerlemediği görülmüştür. Dayanım kayıpları uçucu kül esaslı harçlara kıyasla daha düşük seviyededir. Katkı içeren karışımların dayanım kayıplarının ise referans karışıma kıyasla genelde daha düşük olduğu görülmektedir. 1000°C etkisi ile referans numune %42, katkılı karışımlar ise %12-37 aralığında dayanım kaybına uğramıştır.

7.5 Priz Süresi

Uçucu kül esaslı seçilmiş karışımlara ait priz süreleri Tablo 7.5’de gösterilmiştir. Bu karışımlardan

- U-1.5-10-P3/2: En yüksek yayılma çapı değerinin elde edilmesi,
- U-1.5-10-Nv/5: En düşük basınç dayanımı değerinin elde edilmesi,
- U-1.5-10-M/5: Yüksek yayılma çapına ulaşılmasına rağmen basınç dayanımı üzerinde önemli olumsuz etkilerin görülmesi,
- U-1.5-10-L/5: Yayılma çapının bir miktar artmasına rağmen basınç dayanımının azalması nedenleriyle priz süresi tayini için seçilmiştir.

U-1.5-10 kodlu referans karışımın priz başlangıç ve priz bitiş sürelerinin sırasıyla 110 ve 170 dakika olduğu belirlenmiştir. Polikarboksilat eter (P3) esaslı katkı kullanımının priz başlangıç ve priz bitişini geciktirdiği ancak diğer katkıların priz sürelerini kısalttıkları görülmüştür. En kısa priz sürelerine sahip karışım %5 dozajında naftalin vinil (Nv) esaslı katkı içeren karışımken, %5 Lignin (L) içeren karışımın priz başlangıç süresi referans karışımıyla aynıdır.

Tablo 7.5 Katkı ilavesinin uçucu kül esaslı hamurların priz süresine etkisi.

Kod	Priz Başlangıcı(dk)	Priz Bitişi(dk)
U-1.5-10	110	170
U-1.5-10-P3/2	120	200
U-1.5-10-Nv/5	70	150
U-1.5-10-M/5	80	160
U-1.5-10-L/5	110	155

Yüksek fırın cürufu esaslı seçilmiş karışımlara ait priz süreleri Tablo 7.6'da gösterilmiştir. Bu karışımlardan

- C-1.75-10-Nv/5 En yüksek yayılma çapı değerinin elde edilmesi,
- C-1.75-10-P3/5 Polikarboksilat esaslı katkılarda en düşük basınç dayanımı değerinin elde edilmesi,
- C-1.75-10-L/5 Yüksek yayılma çapına ulaşılmasına rağmen basınç dayanımı üzerinde önemli olumsuz etkilerin görülmesi
- C-1.75-10-N/5 Yayılma çapının bir miktar artmasına rağmen basınç dayanımının azalması nedenleriyle priz süresi tayini için seçilmiştir.

Priz süreleri incelendiğinde YFC esaslı karışımların priz sürelerinin UK esaslı karışımlardan çok daha kısa olduğu görülmektedir. Bunun başlangıç malzemesini oluşturan öğelerin reaktifliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 1.75-10C kodlu referans karışımın priz başlangıcı ve bitişi sürelerinin sırasıyla 40 ve 90 dakika olduğu tespit edilmiştir. Polikarboksilat eter (P3) esaslı katkı dışındaki katkıların priz başlangıcını etkilemediği, priz bitişini ise kısalttıkları tespit edilirken bu katkının UK esaslı harçlarda olduğu gibi priz sürelerini uzattığı belirlenmiştir.

Tablo 7.6 Katkı ilavesinin cüruf esaslı hamurların priz süresine etkisi.

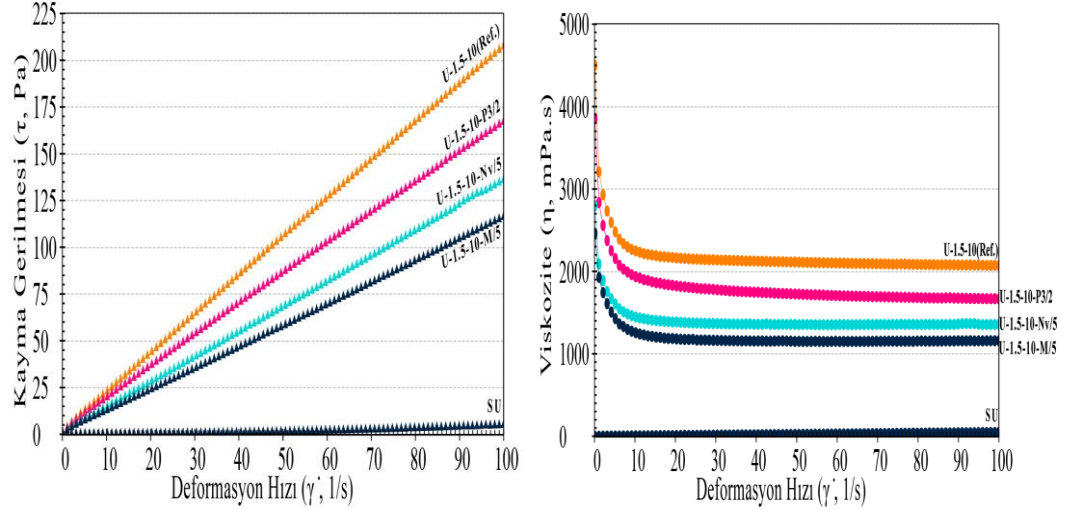
Kod	Priz Başlangıcı(dk)	Priz Bitişi(dk)
C-1.75-10	40	90
C-1.75-10-Nv/5	40	60
C-1.75-10-P3/5	60	100
C-1.75-10-L/5	40	70
C-1.75-10-N/5	40	60

7.6 Reolojik Analizi

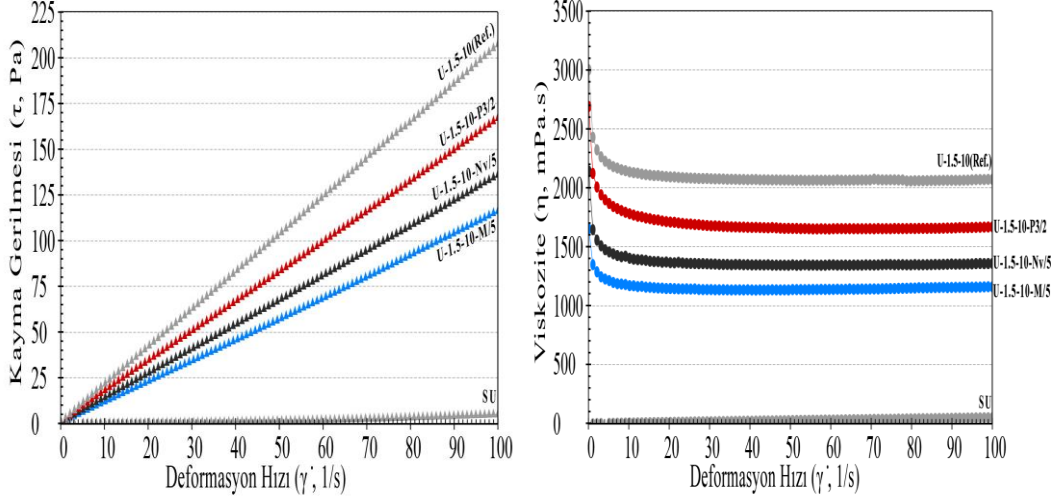
“Anton Paar MCR102e” marka ve model modüler kompakt reometre cihazında yapılan rotasyonel ölçümlerde, rotasyonel hız 0.1-100 rpm aralığında artan ve azalan hızda 4 adımda gerçekleştirilmiş ve kayma her adımda 100 noktada lineer veri alınacak şekilde ST59 karıştırma ucu ile yapılmıştır. Alınan

ölçümler sonucunda grafiklerin oluşturduğu eğri paternlerinde taze geopolimer hamurun Newtonyen sıvı davranışı sergilediği düşünülmüştür. Ancak düşük de olsa bir eşik kayma gerilmesi bulunması nedeniyle modelleme Bingham modeli ile yapılmıştır. Ölçüm iki çıkış ve iki iniş olmak üzere 4 adımda yapılmış olup her bölüme ait grafikler Şekil 7.12-7.19’te gösterilmiştir.

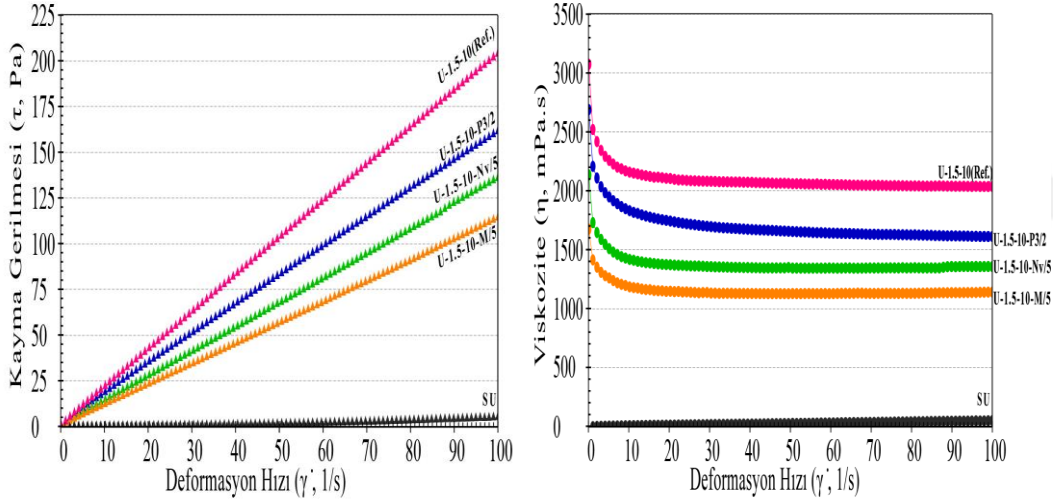
Katkı ilavesi ile aynı deformasyon hızı değerine karşılık gelen kayma gerilmesi ve viskozitenin azaldığı tespit edilmiştir. Yani karışımın daha kolay aktığı ve akış özelliklerinin katkı ilavesi ile iyileştiği çıkarımının yapılması mümkündür. Yayılma çapı değerlerinin seçilen katkıların ilavesi ile birlikte artması da elde edilen verileri desteklemektedir.



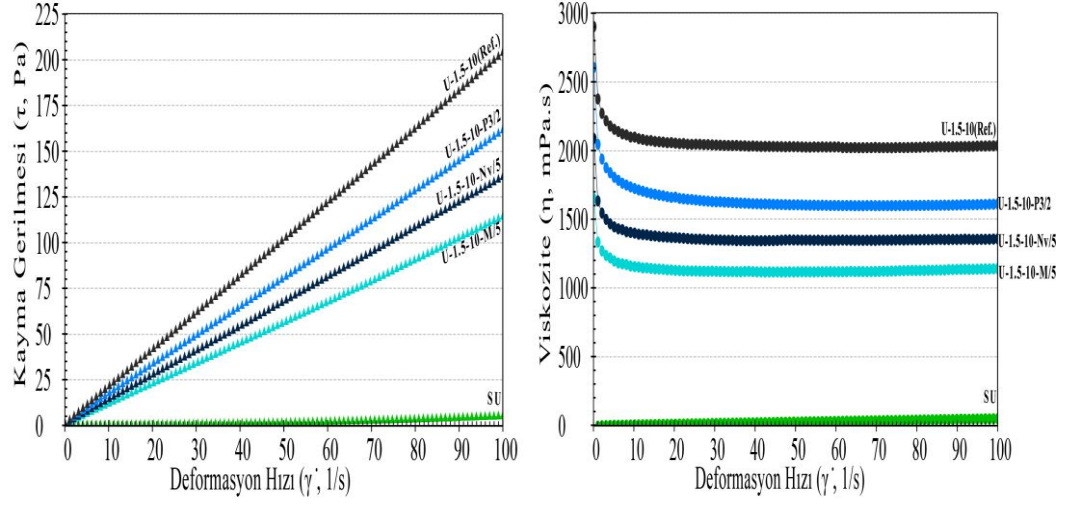
Şekil 7.12 Uçucu kül esaslı hamurların 1. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



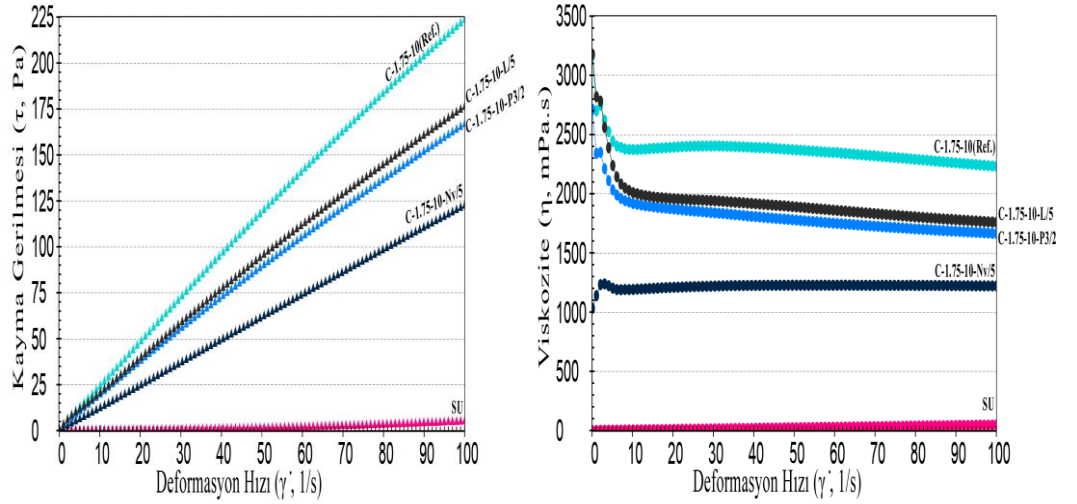
Şekil 7.13 Uçucu kül esaslı hamurların 2. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



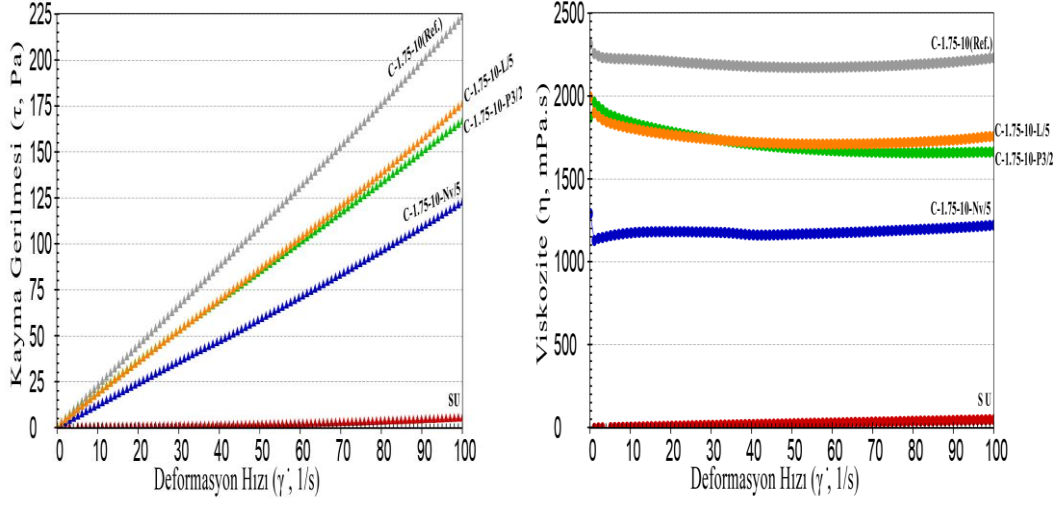
Şekil 7.14 Uçucu kül esaslı hamurların 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



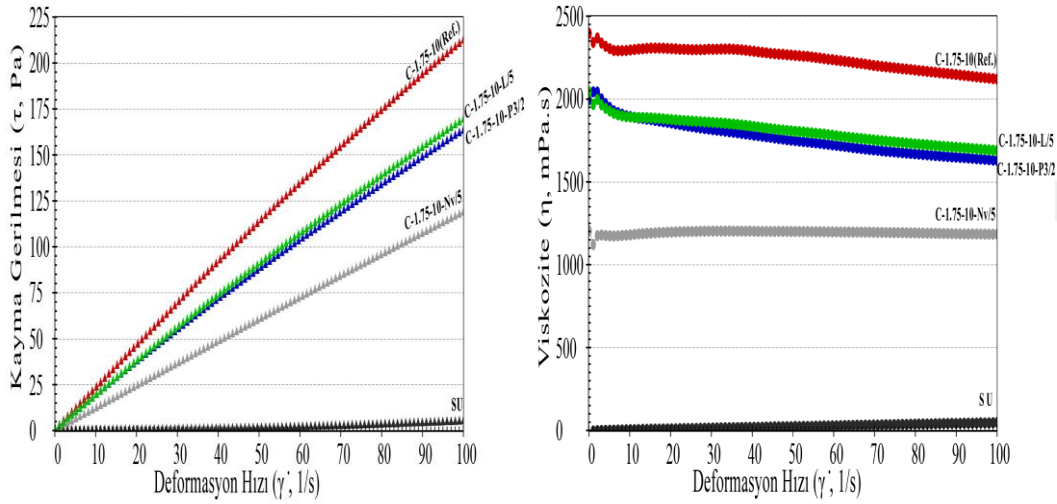
Şekil 7.15 Uçucu kül esaslı hamurların 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



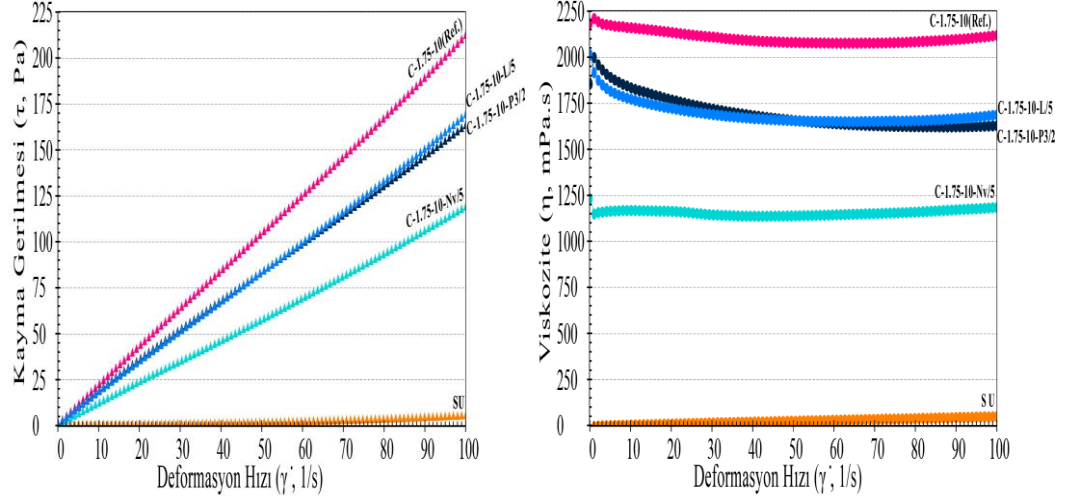
Şekil 7.16 Cüruf l esaslı hamurların 1. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.17 Cüruf esaslı hamurların 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.18 Cüruf esaslı hamurların 3. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.19 Cüruf esaslı hamurların 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.

Uçucu kül ve cüruf esaslı katkı içeren ve katkısız referans karışımların her adım için eşik kayma gerilmeleri ve viskozite değerleri Tablo 7.7’de belirtilmiştir. Tüm numunelerde ilk adımında, karışım harekete ilk kez başladığı için eşik kayma gerilmesi değeri diğer adımlara göre daha yüksektir. Aynı yayılma çapına sahip U-1.5-10 ve C-1.75-10 kodlu referans karışımların her adımda viskozite değerlerinin, katkı içeren karışımlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Fakat, eşik kayma gerilmeleri için aynı şeyin söylenmesi mümkün olmayıp, uçucu kül grubu için U-1.5-10-P3/2 kodlu karışım her adımında en yüksek eşik kayma gerilmesine sahip olduğu saptanmıştır. U-1.5-10-P3/2 kodlu karışımda bulunan polikarboksilat eter esaslı (P3/2) katkı viskozite değerini naftalin vinil (Nv) ve melamin sülfonat (M) kadar düşürememiştir. Bu bağlamda referans karışıma kıyasla polikarboksilat eter B (P3/2) eşik kayma değerini yükseltirken, viskoziteyi diğer katkılara göre daha az düşürmüştür. U-1.5-10-Nv/5 ve U-1.5-10-M/5 kodlu karışımların eşik kayma gerilmesi değerleri birbirine yakındır. Uçucu kül esaslı hamurların viskozite katsayılarının $\eta_{ref.} > \eta_{P3/2} > \eta_{NV/5} > \eta_{MS/5}$ ve eşik kayma gerilmelerinin $\tau_{P3/2} > \tau_{ref.} > \tau_{NV/5} > \tau_{MS/5}$ şeklinde sıralanması mümkündür.

Cüruf esaslı hamurlar incelendiğinde C-1.75-10-L/5 ve C-1.75-10-P3/2 kodlu karışımların viskozite değerlerinin birbirine yakın olduğu, lignin esaslı hamurun eşik kayma gerilmesinin 4 adımda da daha düşük olduğu tespit

edilmiştir. C-1.75-10-Nv/5 kodlu karışım Newtonyen sıvı davranışına yakın sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. C-1.75-10-Nv/5 kodlu karışımın ilk 3 adımındaki eşik kayma gerilmesi sıfır olduğu, 4. adımdaki değerinin ise sıfır değerine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Cüruf esaslı hamurların viskozitelerinin $\eta_{ref.} > \eta_{L/5} > \eta_{P3/2} > \eta_{NV/5}$, eşik kayma gerilmelerinin ise $\tau_{P3/2} > \tau_{L/5} > \tau_{ref.} > \tau_{NV/5}$ şeklinde sıralanması mümkündür.

Tablo 7.7 Karışımlar'a ait eşik kayma gerilmeleri ve viskozite değerleri.

Kod	τ_0 (Pa)				η (mPa.s)			
	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım
U-1.5-10(Ref.)	1.98	0.81	1.46	0.78	2067.5	2053.6	2028.8	2015.4
U-1.5-10-P3/2	3.37	1.47	2.79	1.47	1651.3	1634.8	1595	1581.7
U-1.5-10Nv/5	0.91	0.57	0.73	0.49	1344.1	1338.9	1336.5	1341.6
U-1.5-10M/5	0.98	0.13	0.52	0.21	1139.7	1141.0	1122.5	1120.6
Kod	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım
C-1.75-10-(Ref.)	1.73	0.39	2.33	1.05	2297.2	2182.1	2175.2	2071.6
C-1.75-10-L/5	3.17	1.04	2.82	1.5	1791.5	1706.6	1719.9	1537.5
C-1.75-10-P3/2	3.44	2.7	3.73	3.11	1683.5	1633.1	1647.8	1594.4
C-1.75-10-Nv/5	0	0	0	0.07	1233.9	1189.2	1197	1152.2

Akışkanlaştırıcı katkı ilavesinin geopolimer/alkali-aktif malzeme reolojisi üzerindeki etkisi ile ilgili az sayıda da olsa çalışma yapılmış ve katkı ilavesinin bu tez çalışmasında da yapıldığı gibi eşik kayma gerilmesi ve viskozite üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Laskar and Bhattacharjee (2013), sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisi kullanılarak üretilen uçucu kül esaslı geopolimer betonlarda, lignin ve polikarboksilik eter esaslı katkıların çökme, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite üzerindeki etkisini Bingham modelini kullanarak incelemiştir. Sodyum hidroksit çözeltisi 2.5 ve 6.3 M olmak üzere iki farklı derişimde kullanılmıştır. Araştırmacılar katkıların, sodyum hidroksit derişimine bağlı olarak farklı etkiler gösterdiğini, 2.5 M sodyum hidroksit çözeltisi içeren betonlarda katkı kullanımı ile çökme değerlerinin arttığını, plastik viskozite ve eşik kayma gerilmelerinin azaldığını bildirmiştir. Ancak sodyum hidroksit derişiminin 6.3 M'a yükselmesi ile katkıların çökme değerlerinde %60-80 oranlarında azalışlara sebep olduğu raporlanmıştır.

Anaszewicz (2021) melamin, naftalin, akrilik polimer ve polikarboksilat eter tabanlı akışkanlaştırıcı katkıların sodyum silikat ve sodyum hidroksit

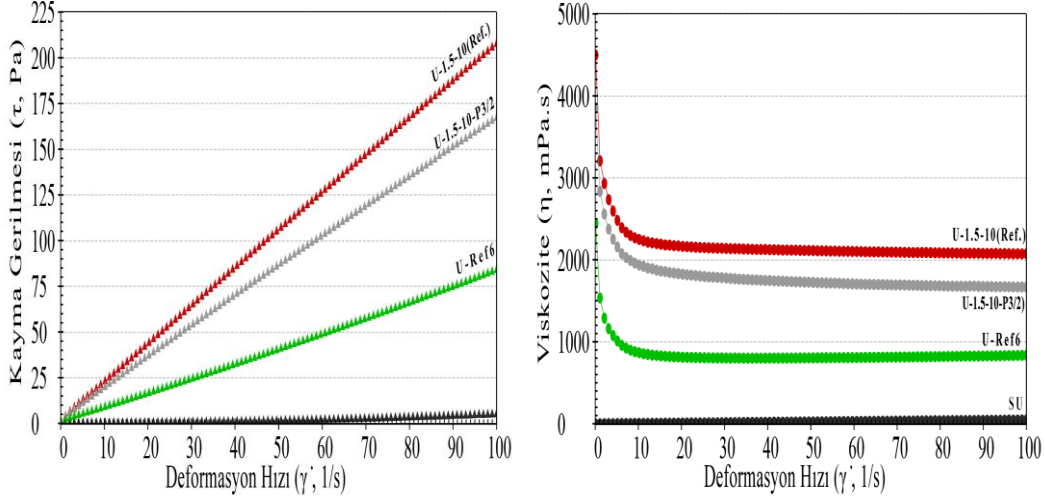
kullanılarak üretilen F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer hamurlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırmacı katkı kullanımı ile viskozitenin azaldığını, en etkili katkı türünün ise naftalin esaslı katkı olduğunu raporlamıştır.

Xiong and Guo (2022), polikarboksilat ve naftalin tabanlı akışkanlaştırıcı katkıların, farklı oranlarda cüruf ikamesi içeren F sınıfı uçucu kül esaslı geopolimer hamurlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada rotasyonel viskozimetre kullanılmış olup analiz Bingham modeli ile yapılmıştır. Araştırmacılar kontrol karışımında 5.20 Pa olan eşik kayma gerilmesinin katkı ilavesi ile 0.85-1.09 Pa arasına düştüğünü raporlamıştır.

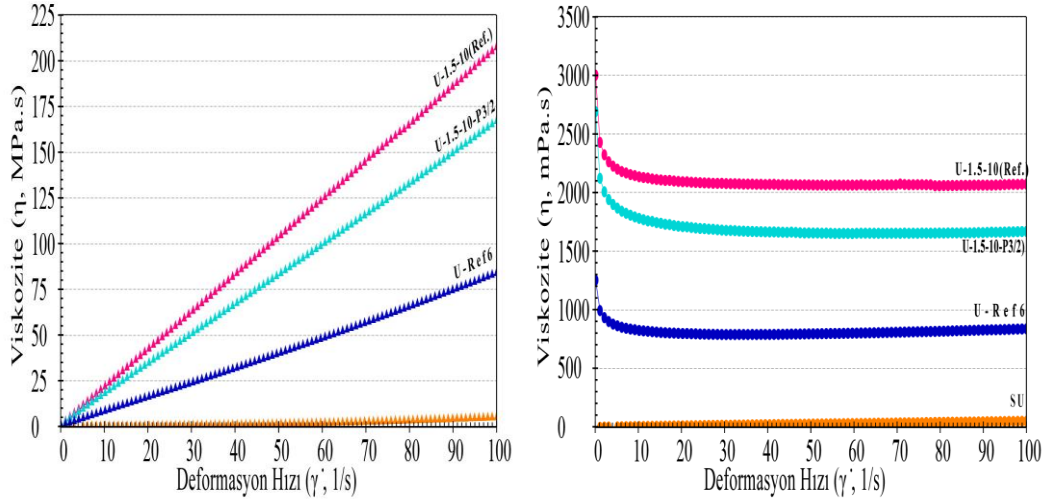
Criado et al. (2009) sıvı/katı oranı 0.4 olan F sınıfı uçucu kül esaslı alkali-aktif hamurlarda katkı ilavesinin reolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiş, ve katkıların eşik kayma gerilmesi üzerinde etkili olduğunu vurgulamıştır. Referans karışımında 2.05 Pa civarında olan eşik kayma gerilmesinin melamin türevi sentetik polimer ve modifiye polikarboksilat eter esaslı katkıların kullanılması ile sırasıyla 1.85 ve 1.25 civarına düştüğü bildirilmiştir.

Benzer bir çalışmada Alnahhal et al. (2020), %20 cüruf ikamesi içeren F sınıfı uçucu kül esaslı alkali-aktif hamurların çözelti/bağlayıcı ve Ms oranındaki değişikliklerin reolojik özellikler üzerindeki etkisini incelemiş ve eşik kayma gerilmelerinin yaklaşık olarak 0.10-0.70 Pa arasında değiştiğini bildirmiştir.

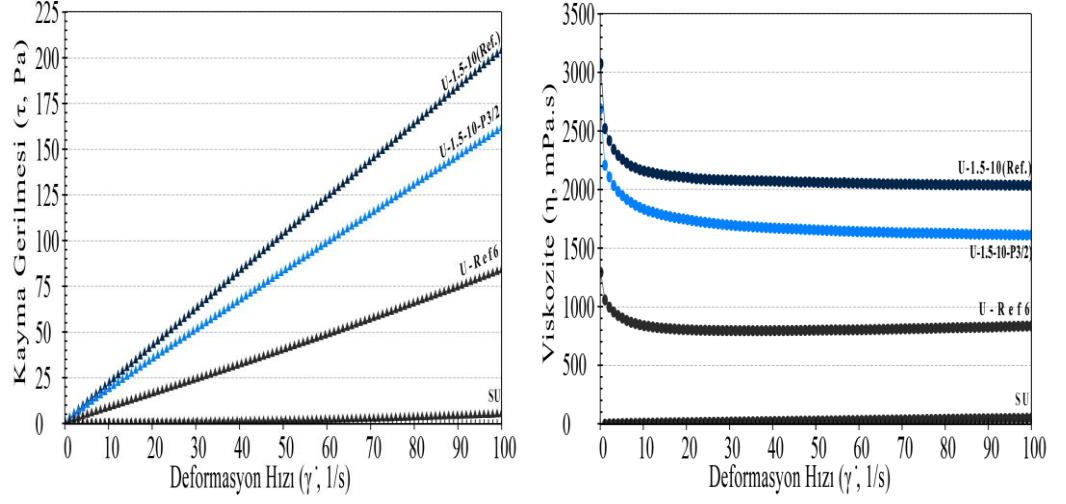
Reolojik incelemede elde edilen verilerin de yayılma çaplarında olduğu gibi katkı ilavesinden mi su içeriğinden mi kaynaklandığının araştırılması gerekmiştir. Bu kapsamda, katkıdan gelen su ile aynı miktarda su içeren karışımların reolojik ölçümleri, katkılı karışımlarla birlikte yapılmış ve her bir adım için elde edilen grafikler Şekil 7.20 ve Şekil 7.39 arasında gösterilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı ile aynı miktarda su içeren karışımların viskozitelerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir.



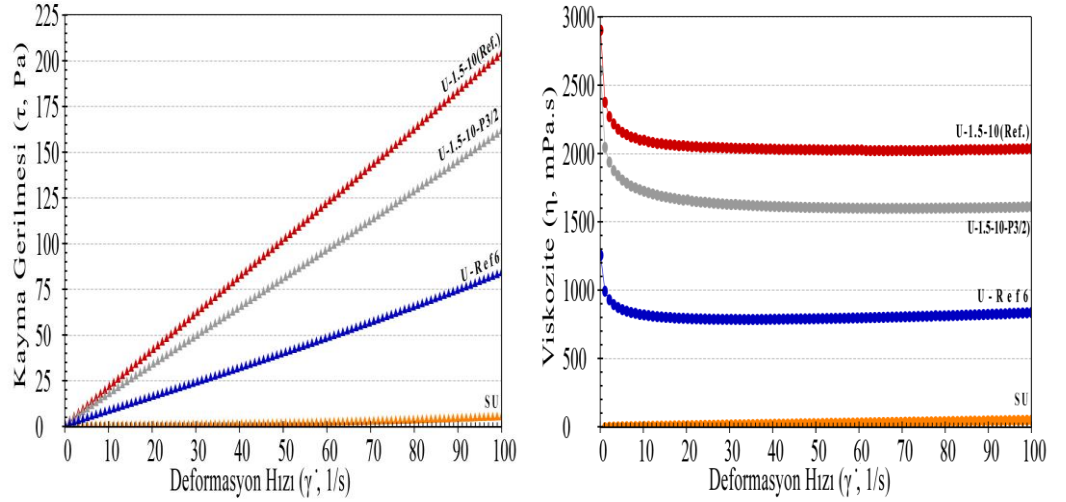
Şekil 7.20 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



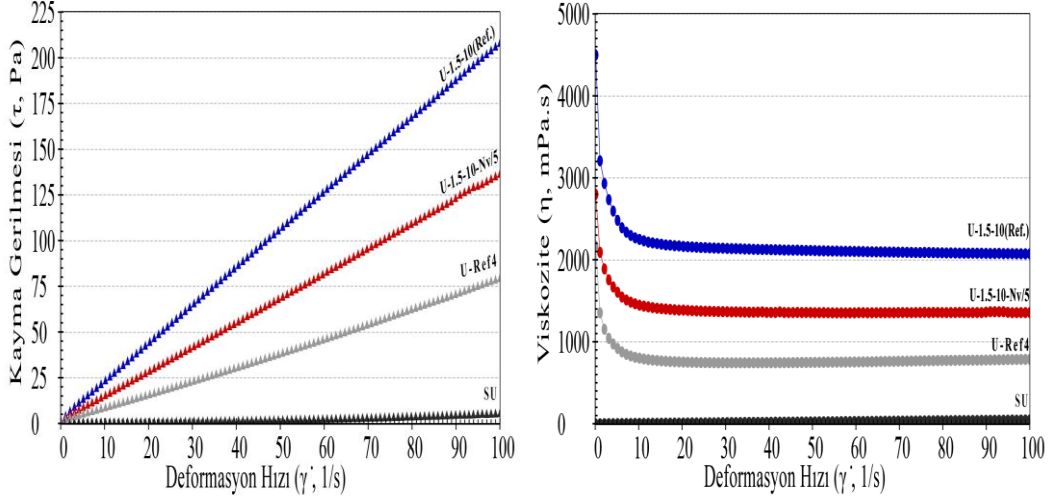
Şekil 7.21 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



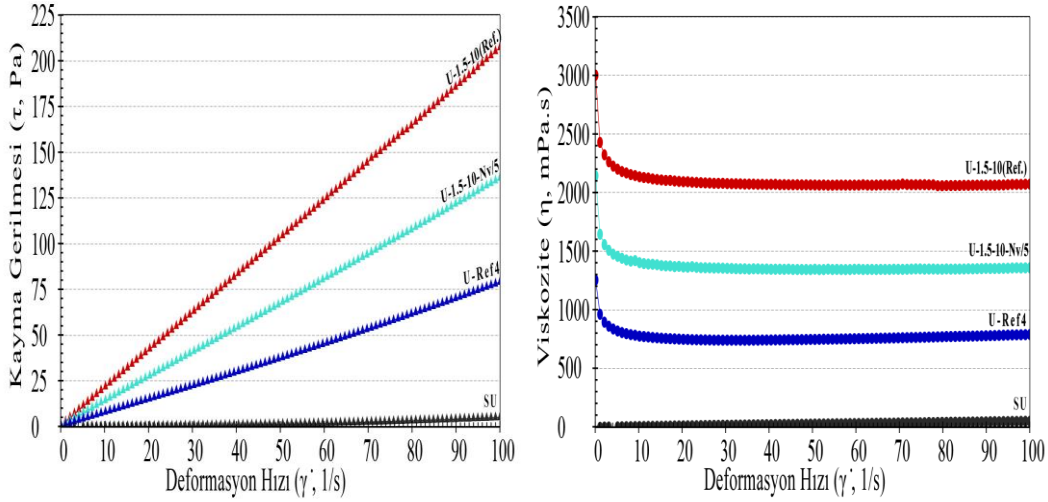
Şekil 7.22 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



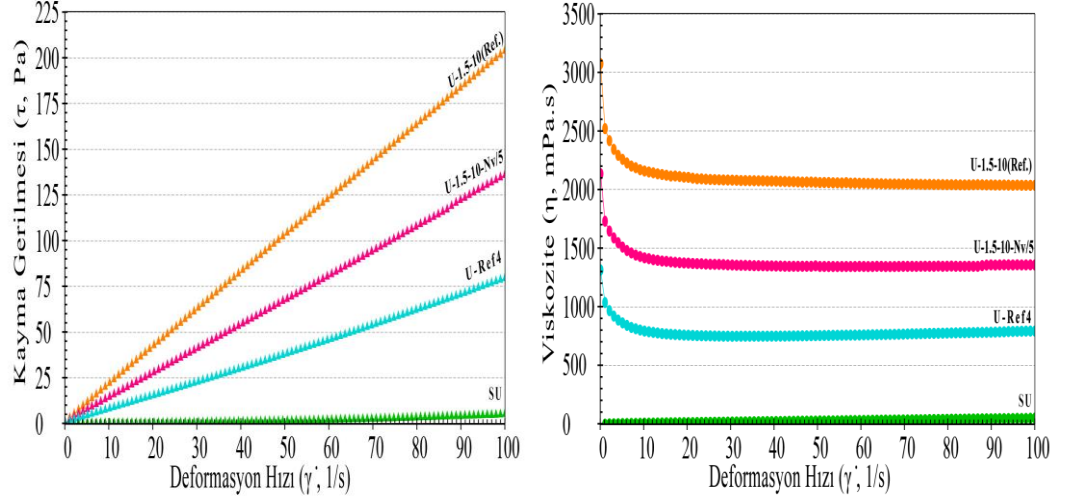
Şekil 7.23 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



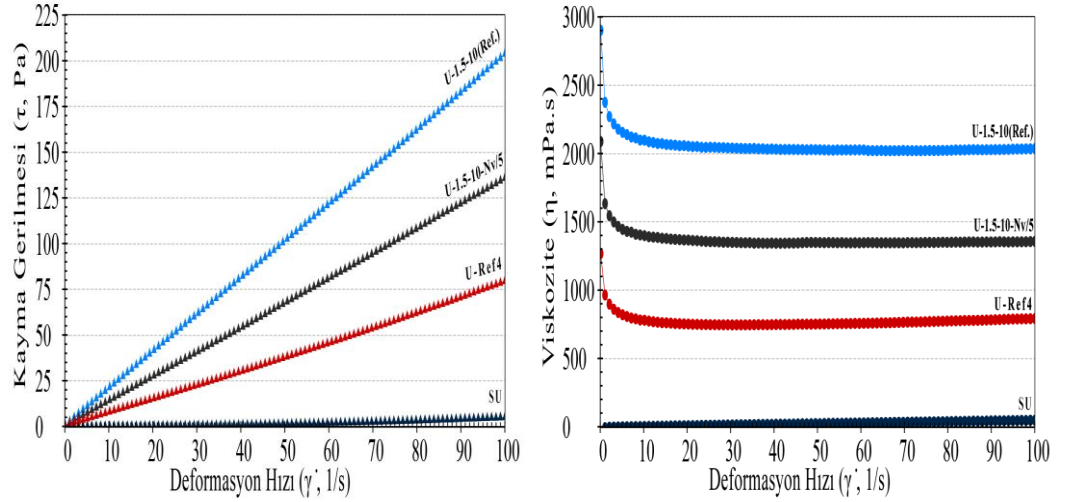
Şekil 7.24 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



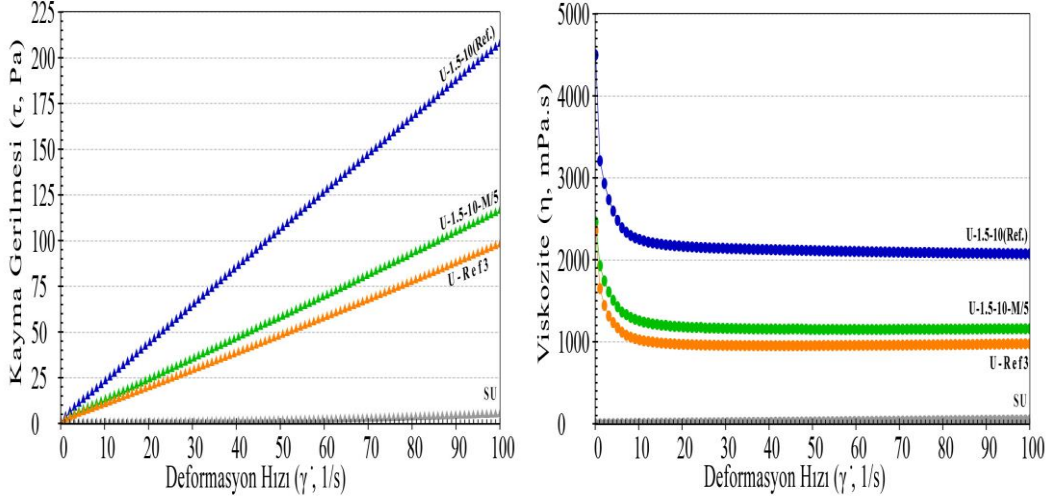
Şekil 7.25 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



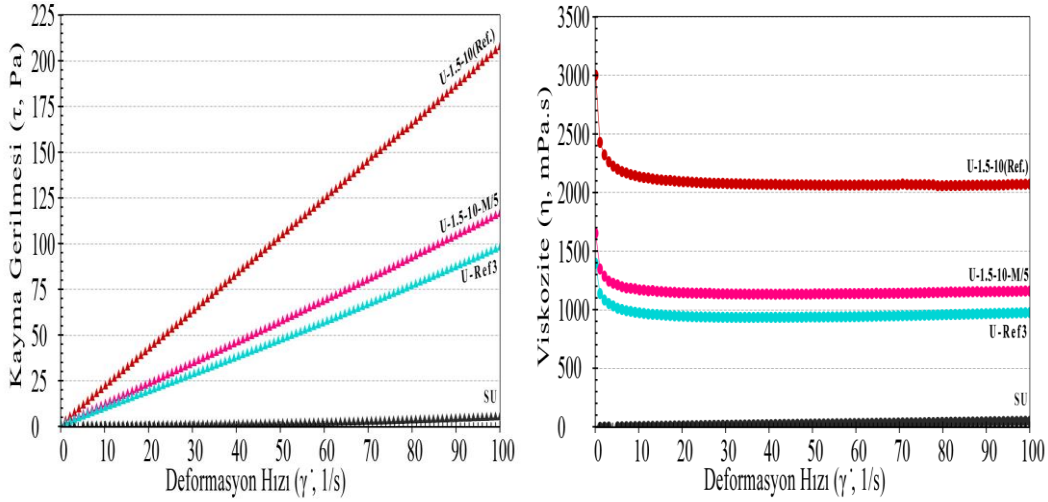
Şekil 7.26 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



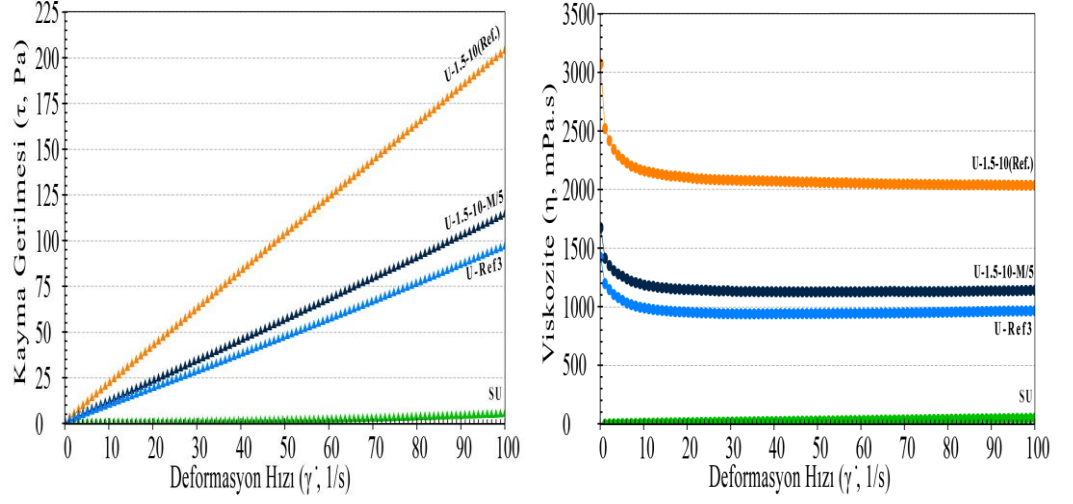
Şekil 7.27 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



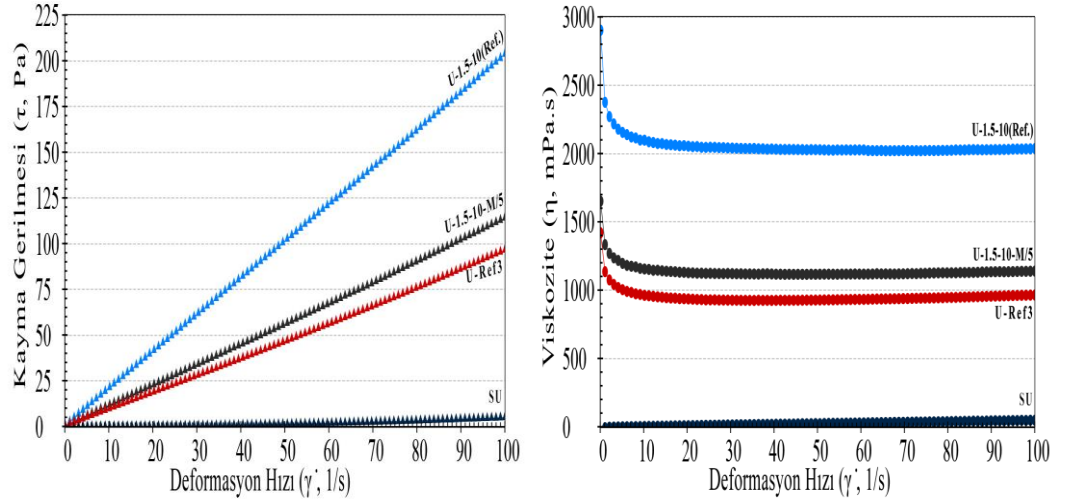
Şekil 7.28 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



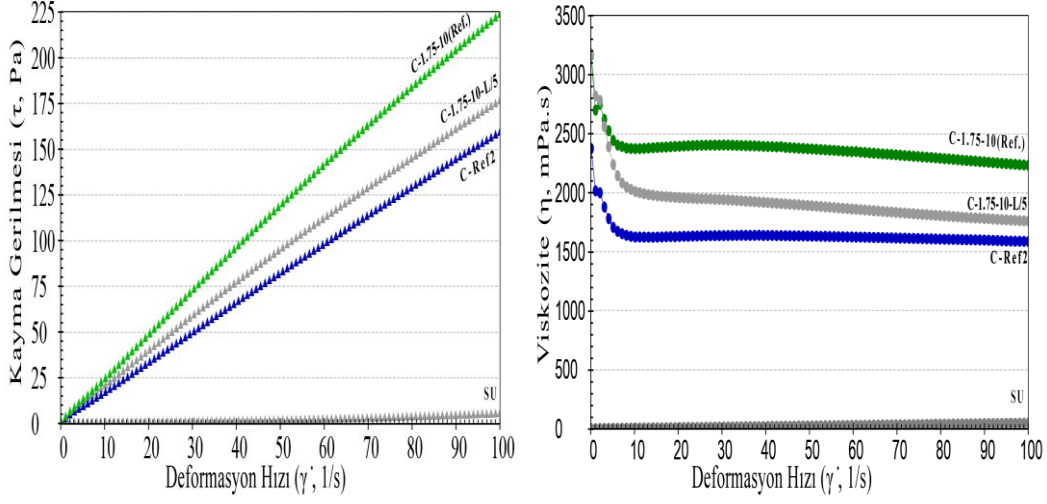
Şekil 7.29 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



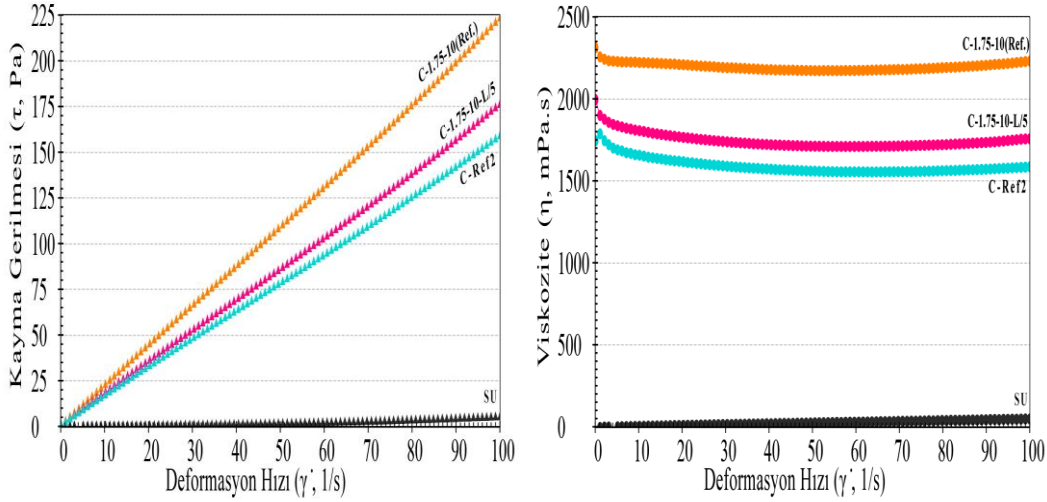
Şekil 7.30 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



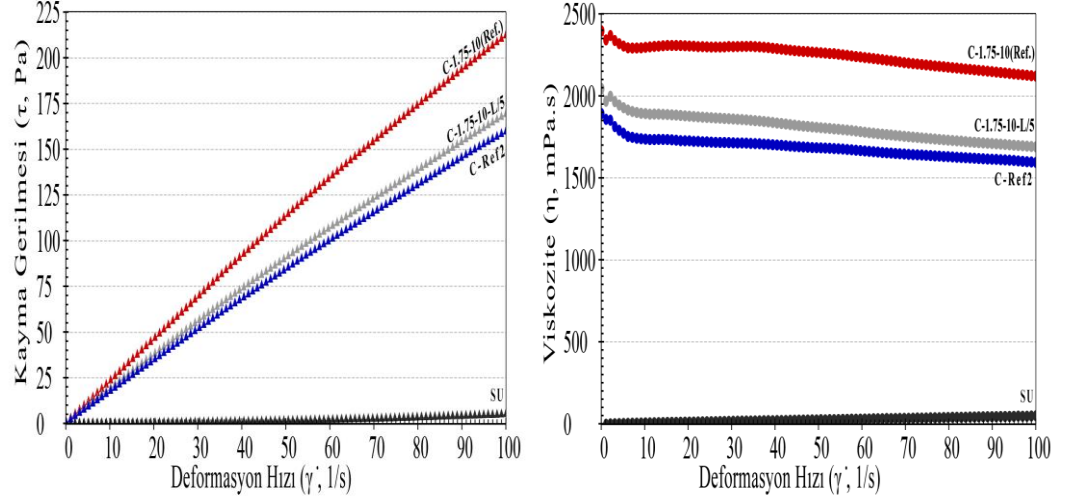
Şekil 7.31 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



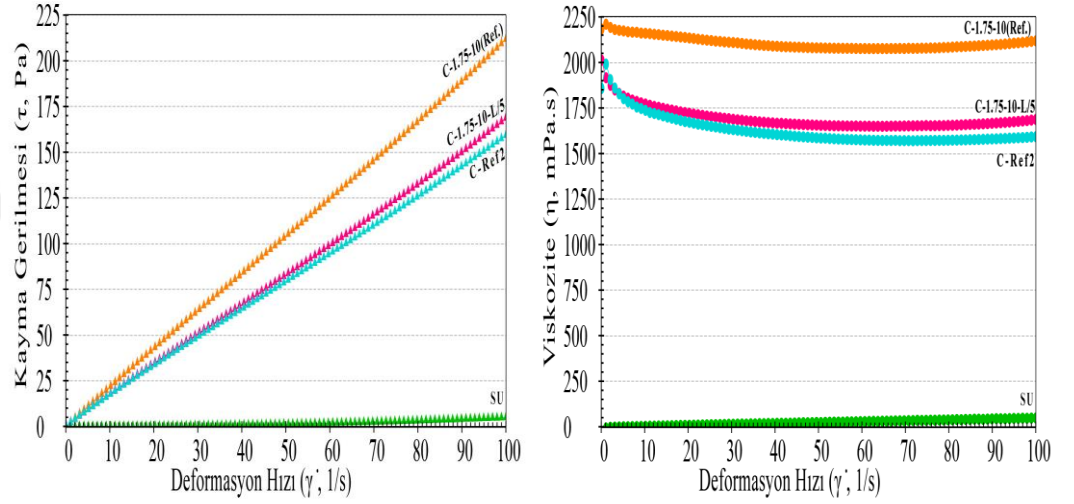
Şekil 7.32 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



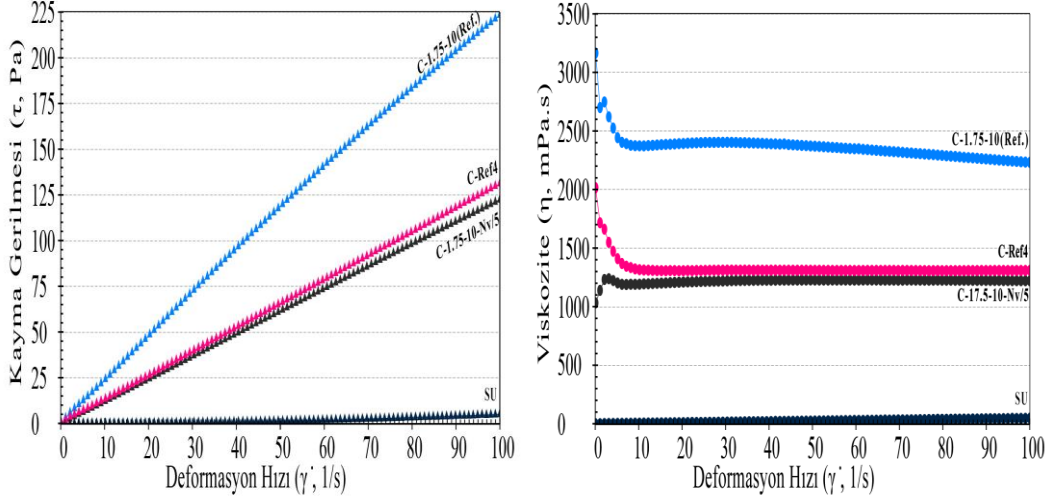
Şekil 7.33 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



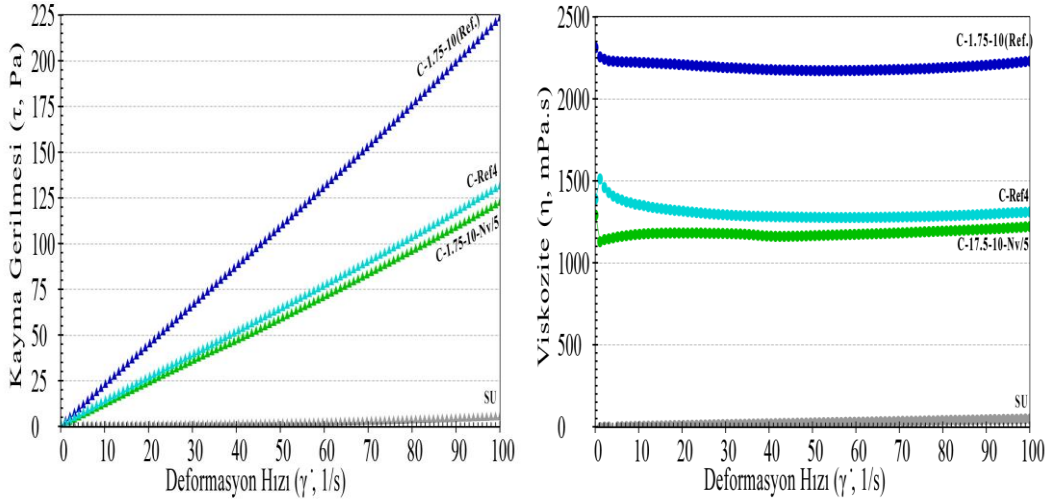
Şekil 7.34 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



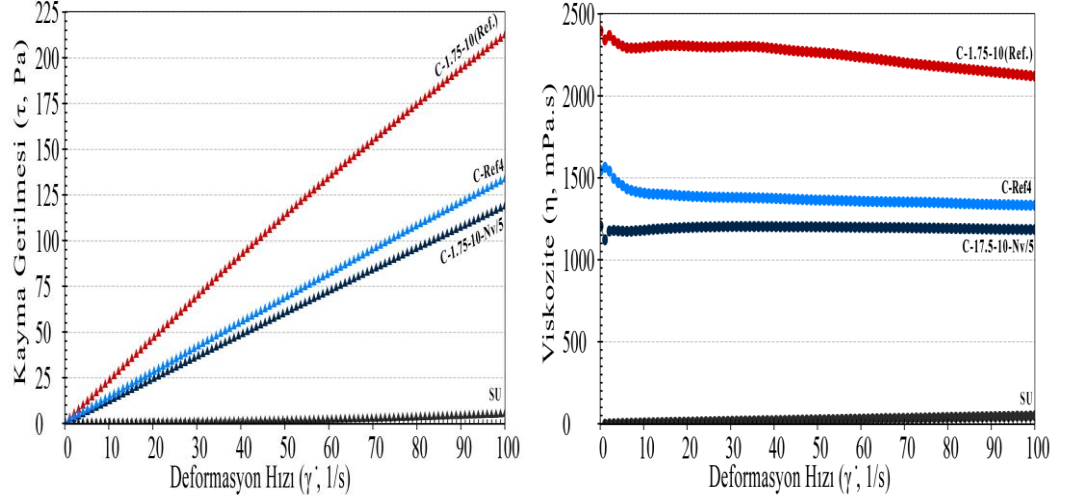
Şekil 7.35 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



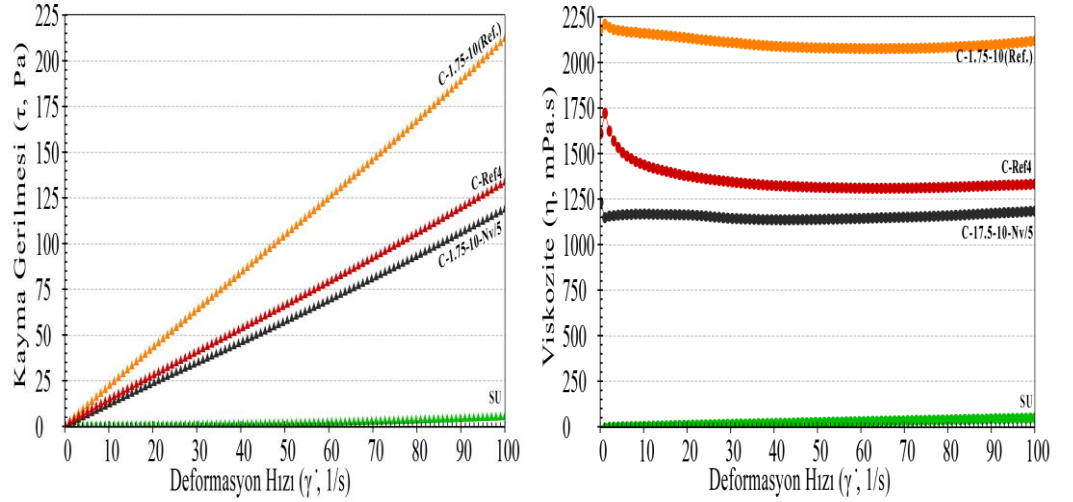
Şekil 7.36 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 1. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.37 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 2. adımdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.38 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 3. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.



Şekil 7.39'de C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur ile bu hamurla aynı miktarda su içeren referans karışımın 4. adımıdaki kayma gerilmesi-deformasyon hızı ve viskozite-deformasyon hızı grafikleri.

Seçilen karışımlara ait viskozite ve eşik kayma değerleri Tablo 7.8'de kıyaslamalı olarak gösterilmiştir. Polikarboksilat eter B (P3/2)'nin içeriğindeki su miktarı belirlenerek oluşturulan U-Ref6 kodlu karışım, U-1.5-10-P3/2 kodlu karışıma göre daha düşük eşik kayma gerilmesine ve viskoziteye sahiptir.

Naftalin vinil (Nv/5) ile oluşturulan U-1.5-10-Nv/5 kodlu karışım ve bu karışımla aynı miktarda su içeren U-Ref4 kodlu karışım oldukça yakın eşik kayma

gerilmesi ve viskozite değerlerine sahiptir. Sadece ilk adımda ve son adımda eşik kayma gerilmeleri farkı yüksektir. Naftalin vinil (Nv/5)'in yüksek miktarlarda su içermesinin bu benzerliğin elde edilmesinde büyük rol oynadığı düşünülmektedir.

Lignin (L/5) ile üretilen C-1.75-10-L/5 kodlu numune ve aynı miktarda su içeren ancak katkı içermeyen C-Ref2 kodlu karışımın viskozite değerlerinin oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Fakat C-1.75-10-L/5 kodlu karışım, ikinci ve dördüncü adımda (yani ölçümün iniş adımlarında) C-Ref2'den daha düşük bir kayma gerilmesi değerine sahiptir.

Naftalin vinil (Nv/5) ile üretilen C-1.75-10-Nv/5 kodlu karışım ve bu karışımla aynı miktarda su içeren C-Ref4 karışımı incelendiğinde katkı içeren karışımın daha yüksek bir viskozite değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7.8 Katkı içeren karışımlar ve bu karışımlarla aynı miktarda su içeren karışımlara ait viskozite değerleri ve eşik kayma gerilmeleri.

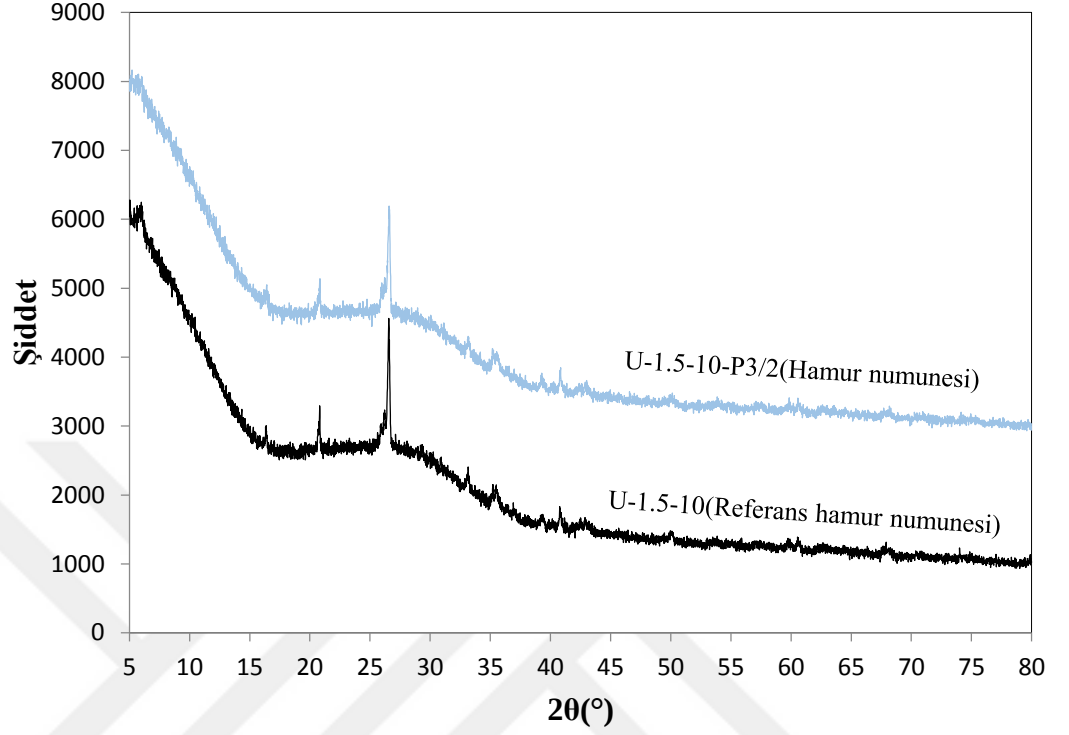
Kod	τ_0 (Pa)				η (mPa.s)			
	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım	1.adım	2.adım	3.adım	4.adım
U-1.5-10(Ref.)	1.98	0.81	1.46	0.78	2067.5	2053.6	2028.8	2015.4
U-1.5-10-P3/2	3.37	1.47	2.79	1.47	1651.3	1634.8	1595.7	1581.7
U-Ref6	0.70	0.19	0.39	0.10	1109.2	1107.2	1104.0	1104.0
U-1.5-10-Nv/5	0.91	0.57	0.73	0.49	1344.1	1338.9	1336.5	1341.6
U-Ref4	0	0	0	0	762.42	762.68	767.25	768.3
U-1.5-10-M/5	0.98	0.13	0.52	0.21	1139.7	1141.0	1122.5	1120.6
U-Ref3	0.42	0	0.21	0	955.2	949.7	945.5	939.9
C-1.75-10(Ref.)	1.73	0.39	2.33	1.05	2297.2	2182.1	2175.2	2071.6
C-1.75-10-L/5	3.17	1.04	2.82	1.50	1791.5	1706.6	1719.9	1637.0
C-Ref2	0.35	1.24	1.85	2.22	1612.3	1546.2	1623.5	1549.1
C-1.75-10-Nv/5	0	0	0	0.07	1233.9	1189.2	1197.0	1152.2
C-Ref4	0.01	0.7	0.93	1.52	1310.7	1274.0	1340.5	1294.6

7.7 XRD Analizi

Her alüminosilikat için referans karışımlar ile en yüksek yayılma çapının elde edildiği karışımlara ait hamurlar üzerinde XRD incelemesi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda elde edilen XRD spektrum grafikleri Şekil 7.40 ve Şekil 7.41'da gösterilmiştir.

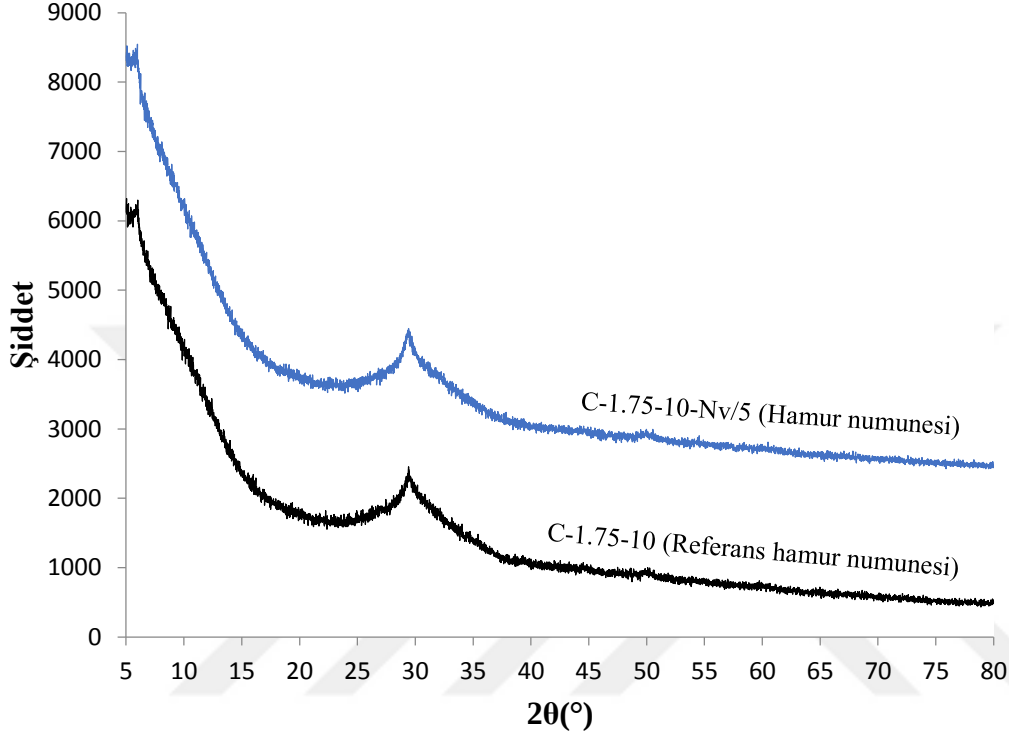
Uçucu kül esaslı hamurlar üzerinde yapılan XRD incelemesinde katkı ilavesi ile hamur kristal yapısının ciddi bir değişikliğe uğramadığı ve pik

şiddetlerinin bir miktar değiştiği tespit edilmiştir. Bu da katkı ilavesinin kristal yapı üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 7.40 U-1.5-10 ve U-1.5-10-P3/2 kıyaslamalı XRD spektromları.

Cüruf esaslı karışımlarda da benzer bir inceleme gerçekleştirilmiş, bunun için en yüksek yayılma çapı değerinin elde edilmesini sağladığı için U-1.75-10-Nv/5 karışımı seçilmiştir. Uçucu küle benzer şekilde ilave edilen akışkanlaştırıcının kristal yapıya ciddi bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.



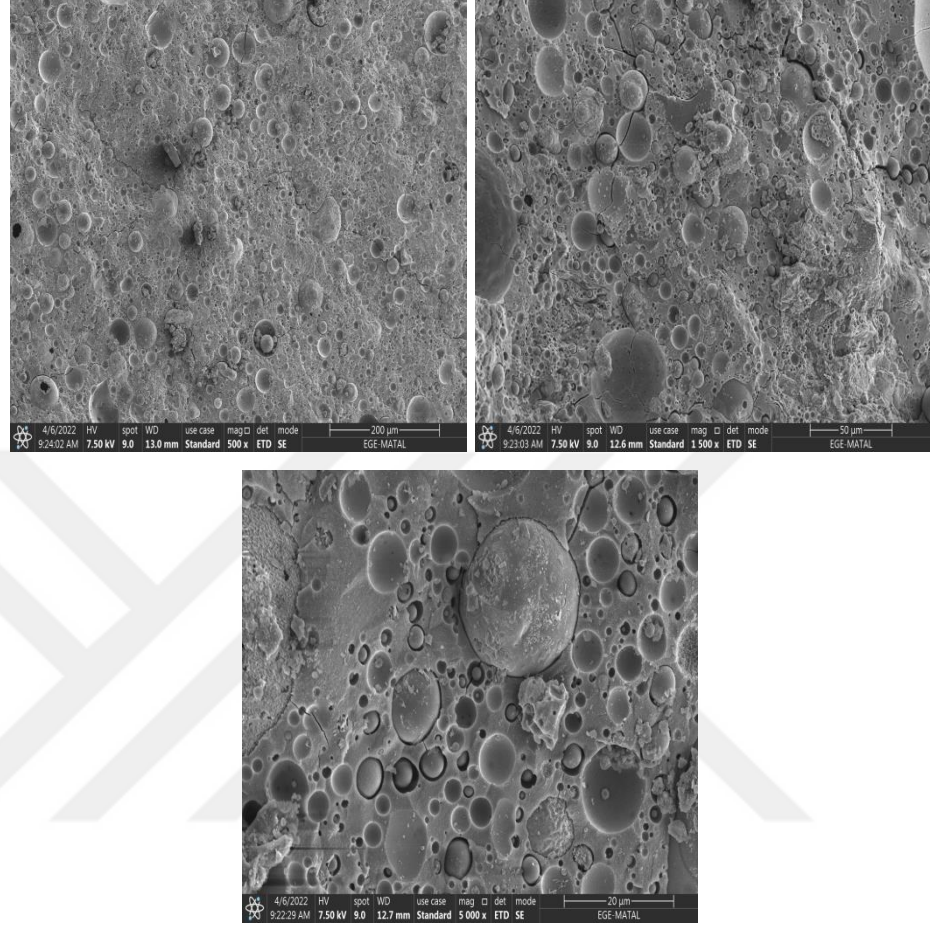
Şekil 7.41 C-1.75-10 ve C-1.75-10-Nv/5 kıyaslamalı XRD spektromu.

7.8 SEM Analizi

60°C’de 72 saat boyunca etüvde kürlenmiş cüruf ve uçucu kül esaslı katkı içeren veya içermeyen hamur numuneler üzerinde kırık yüzey ile SEM/EDS incelemeleri yapılmıştır.

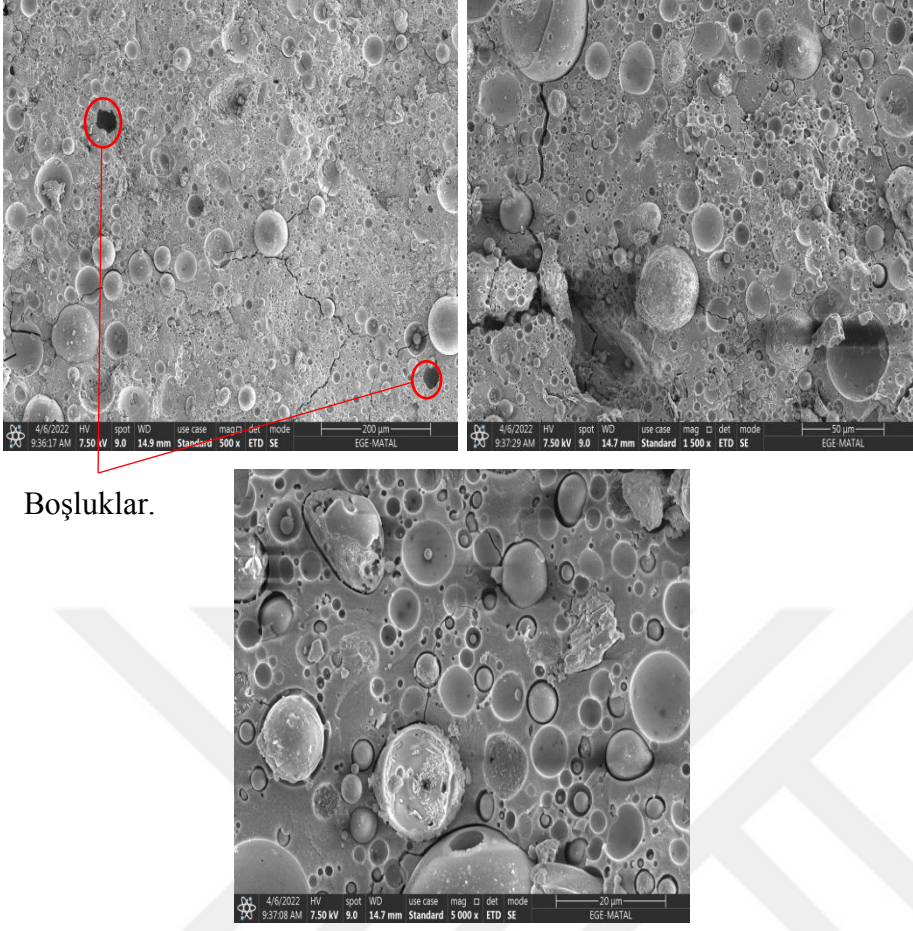
UK-1.5-10 kodlu referans numuneye ait hamurun SEM görüntüleri Şekil 7.42’de sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde hamurun matris, reaksiyona girmemiş ve kısmen reaksiyona girmiş taneciklerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca gerek matriste gerekse de matris-kül taneciği arayüzeyde çatlaklar bulunmaktadır. Bunların yanı sıra bazıları uçucu kül taneciklerinin kırılan yüzeyin diğer kısmında kalması nedeniyle oluşan küresel boşluklar, bazıları da

yerleştirmeden kaynaklanan veya reaksiyon ürünlerinin dolduramadığı nispeten küçük boşluklar göze çarpmaktadır.



Şekil 7.42 U-1.5-10 kodlu referans hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

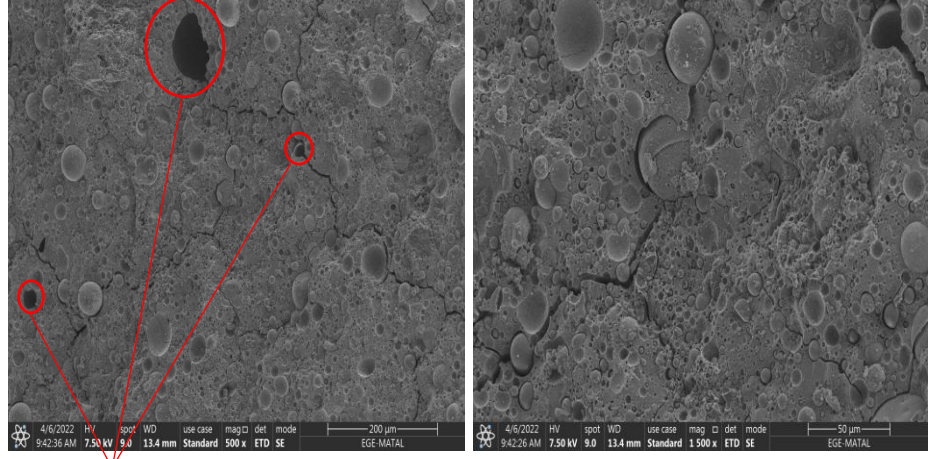
U-1.5-10-P3/2 kodlu karışım aıt SEM görüntüleri Şekil 7.43’de sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde hamur yapısının genel anlamda referans uçucu kül esaslı hamura benzediğı ancak buna kıyasla bir miktar daha fazla boşluk içerdığı belirlenmiştir.



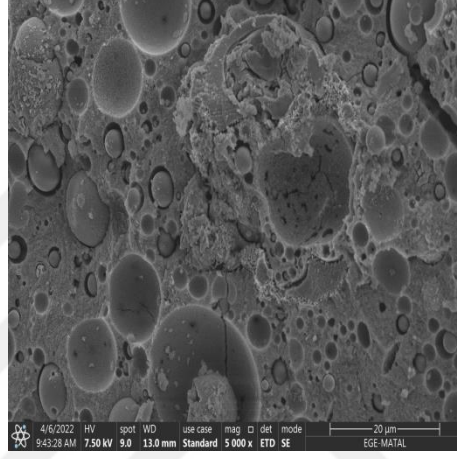
Boşluklar.

Şekil 7.43 U-1.5-10-P3/2 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

U-1.5-10-Nv/5 kodlu karışıma ait SEM görüntüleri Şekil 7.44’de sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde, bu hamurun referans numuneye kıyasla hem ana matriste hem de tane-hamur arayüzeyinde daha fazla sayıda boşluk ve çatlak içerdiği, yapının daha az yoğun ve heterojen bir formda olduğu tespit edilmiştir.

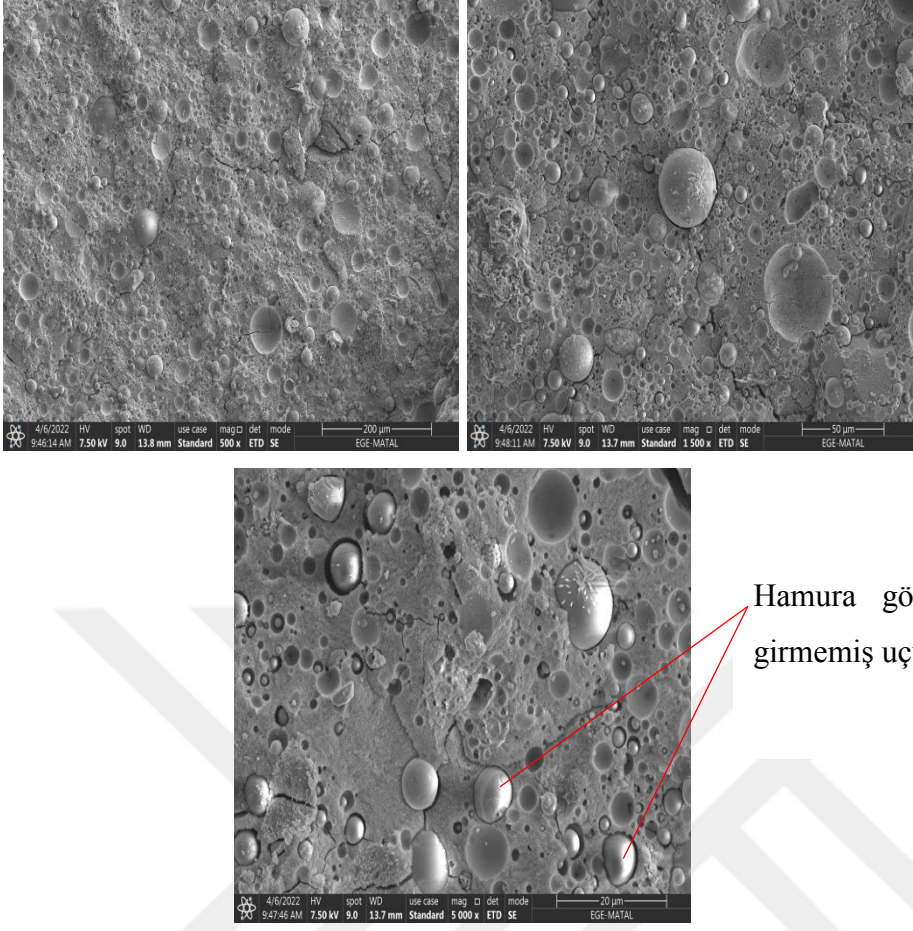


Boşluklar.



Şekil 7.44 U-1.5-10-Nv/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

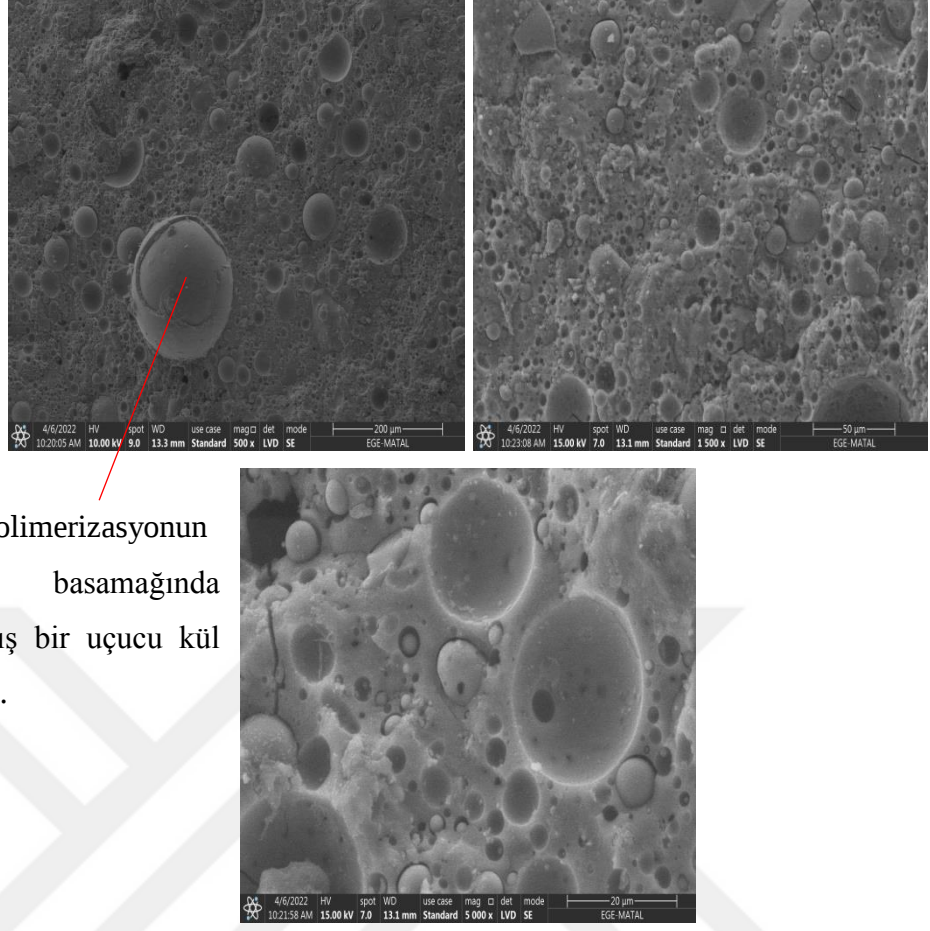
U-1.5-10-M/5 kodlu karışıma ait SEM görüntüleri Şekil 7.45’de sunulmuştur. Hamur yapısının diğer hamurlara benzer şekilde boşluk, çatlak ve reaksiyona girmemiş tanecikler içerdiği ve benzer yapıda olduğu belirlenmiştir.



Hamura gömülü reaksiyona girmemiş uçucu kül taneleri.

Şekil 7.45 U-1.5-10-M/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

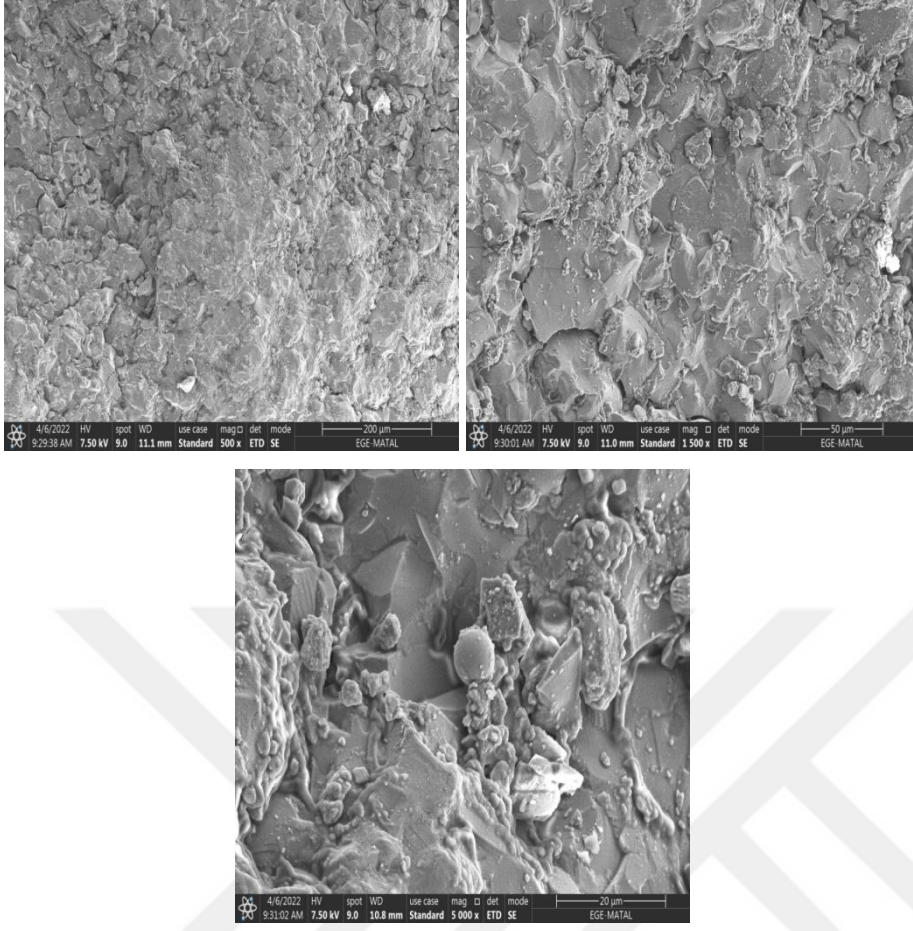
U-1.5-10-L/5 kodlu karışıma ait SEM görüntüleri Şekil 7.46'da sunulmuştur. Bu karışımda da boşluk ve çatlakların yanı sıra reaksiyona girmemiş veya kısmen reaksiyona girmiş tanecikler mevcuttur.



Geopolimerizasyonun tahrip basamağında açılmış bir uçucu kül tanesi.

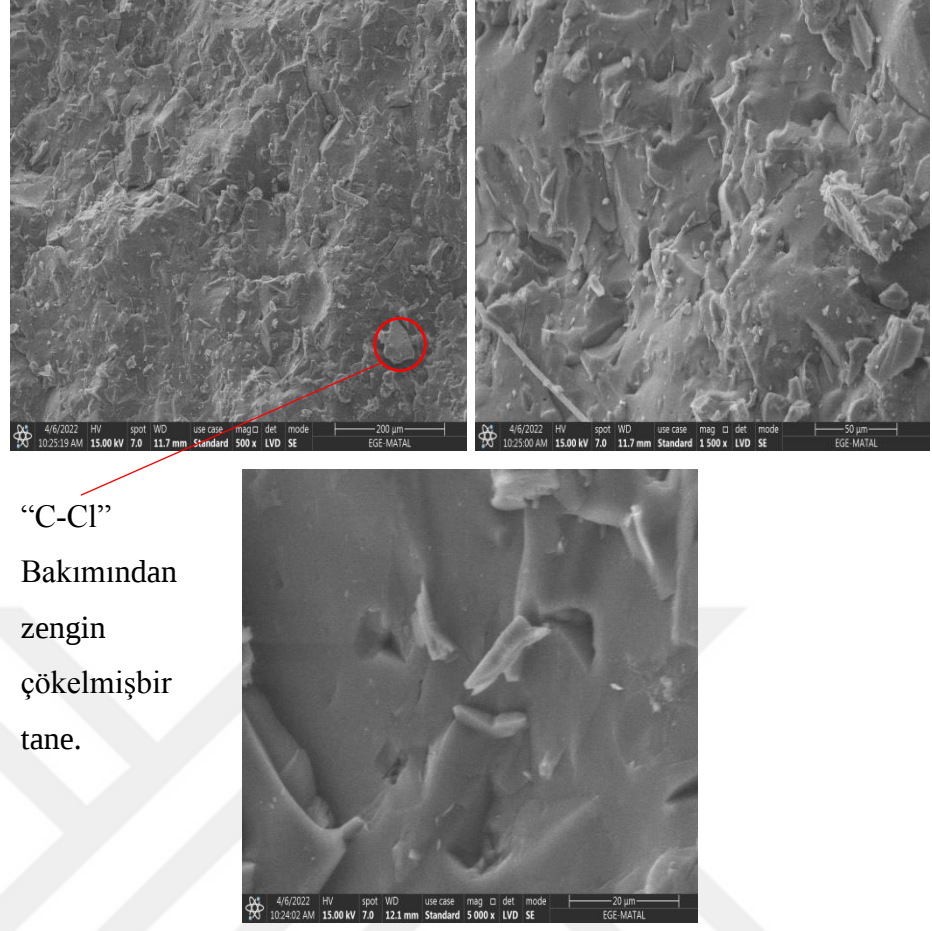
Şekil 7.46 U-1.5-10-L/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

C-1.75-10 kodlu, cüruf esaslı referans hamura ait SEM görüntüleri Şekil 7.47’de gösterilmiştir. Bu hamurda matrisin uçucu küle kıyasla daha pürüzsüz ve düz bir görüntüde olduğu ve bu durumun tüm cüruf esaslı hamurlarda da aynı biçimde olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan EDS analizlerinde cüruf esaslı numuneler daha çeşitli elemental yelpazeye ek olarak yer yer karbonlu bileşiklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Zengin bileşik içeriği sayesinde cüruf başlangıç malzemesinin daha reaktif ve daha güçlü bir jel oluşturabilmesi muhtemel görünmektedir.



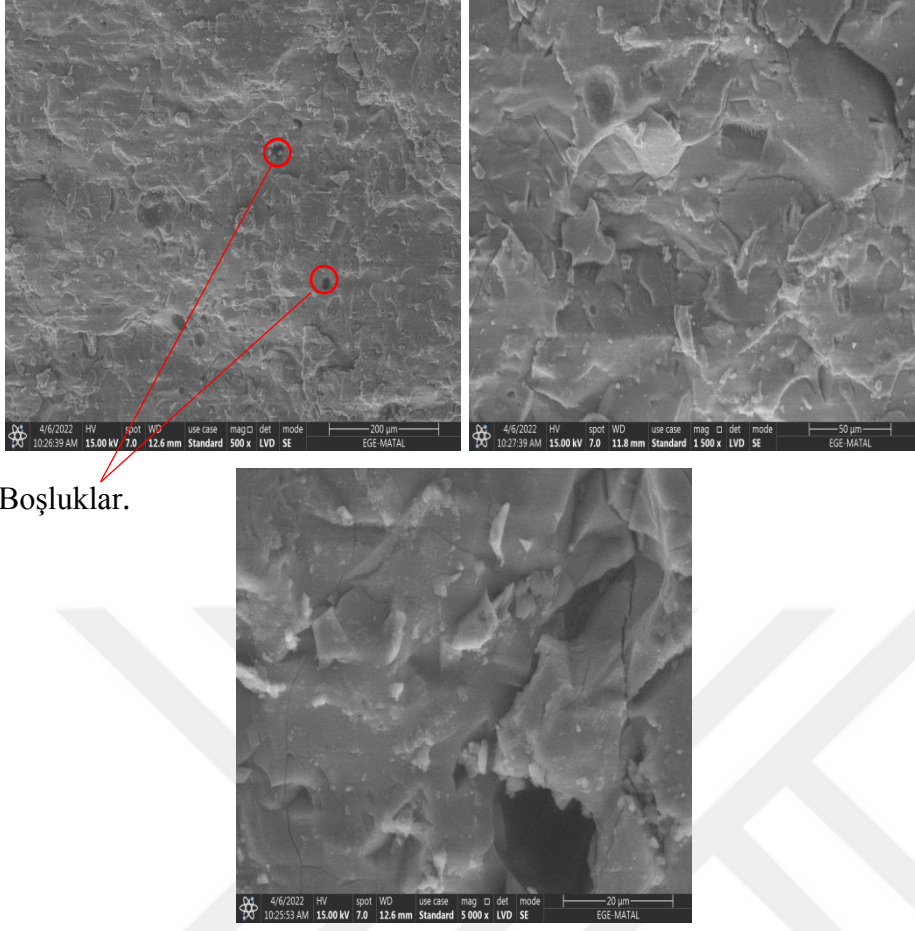
Şekil 7.47 C-1.75-10 kodlu referans hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

1.75-10C-Nv/5 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 7.48’de sunulmuş olup hamurun referans karışıma yakın bir içyapıda olduğu görülmektedir. Kırmızı çember içine alınan biçimsiz yapının, naftalin vinil esaslı katkının tuz olarak çökmesinden dolayı ortaya çıktığı düşünülmektedir. Yapılan EDS analizinde bu bölgede %24 Cl ve %18 C bulunduğunun tespit edilmesi de bu düşüncüyü desteklemektedir.



Şekil 7.48 C-1.75-10-Nv/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

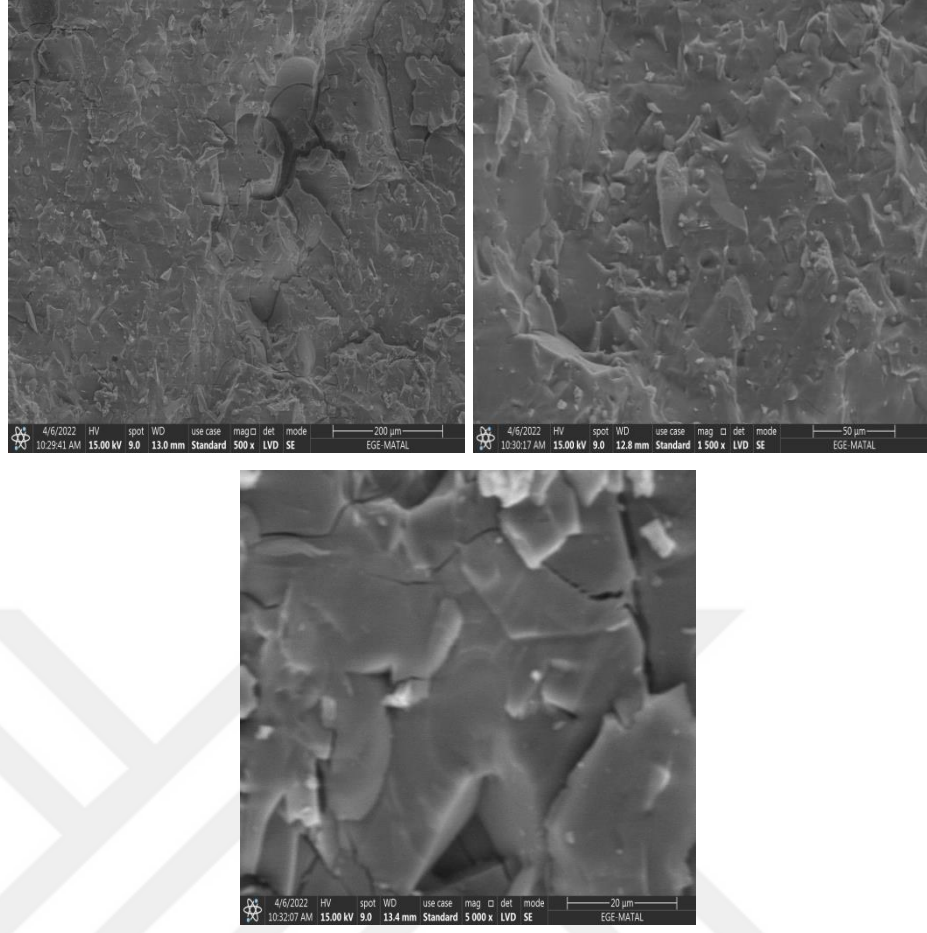
1.75-10C-P3/5 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri şekil 7.49’da verilmiş olup yapıda bazı boşluk ve çatlakların bulunduğu ancak matrisin hala genel anlamda referans karışıma ait matrise benzediği gözlemlenmiştir.



Boşluklar.

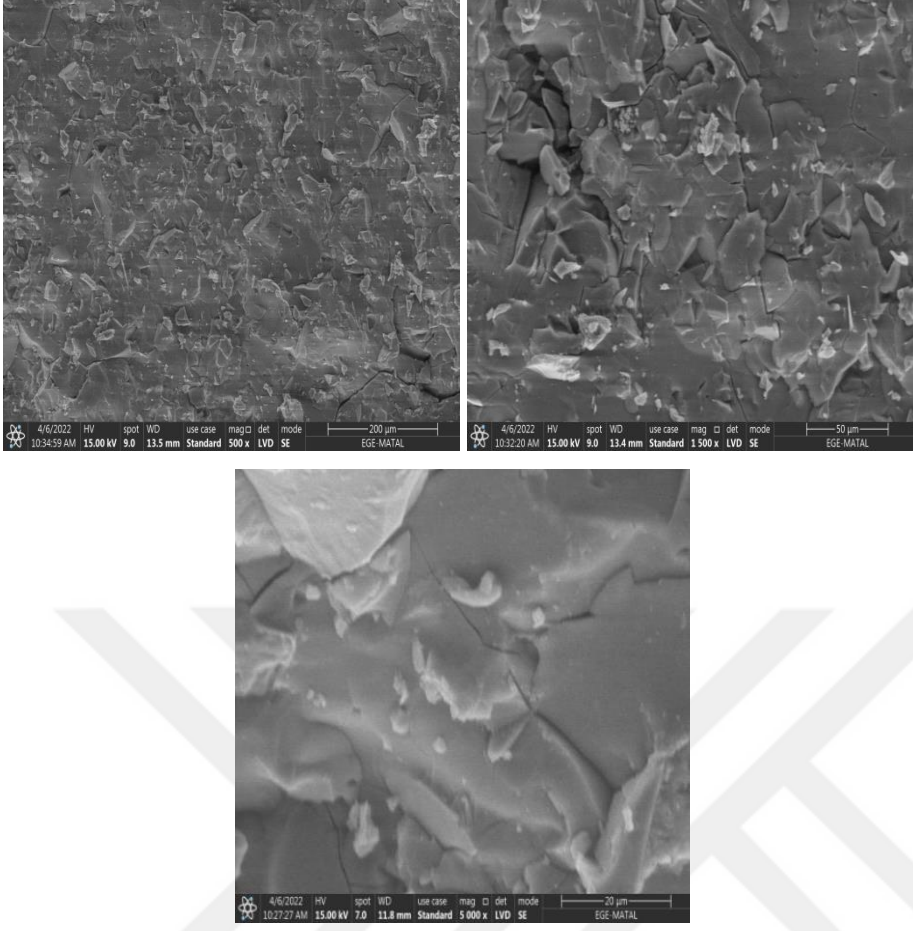
Şekil 7.49 C-1.75-10-P3/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

1.75-10C-L5 kodlu hamura ait SEM görüntüleri Şekil 7.50’de verilmiştir. Hamur homojen bir bünye sergilenmiştir. Hamurdaki görüntülerin önceki hamurlara benzediği ancak belirli noktalarda boşluk ve çatlakların yoğunlaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.50 C-1.75-10-L/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

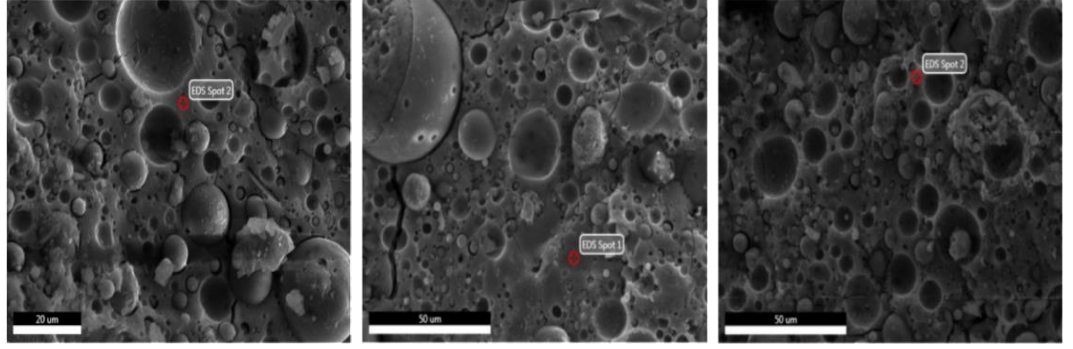
1.75-10C-N/5 kodlu hamura ait SEM görüntüleri Şekil 7.51’de verilmiş olup hamur genel anlamda homojen bir yapı sergilemektedir. Yer yer çatlakların bünyede yer aldığı da tespit edilmiştir.



Şekil 7.51 C-1.75-10-N/5 kodlu hamur numunesine ait SEM görüntüleri.

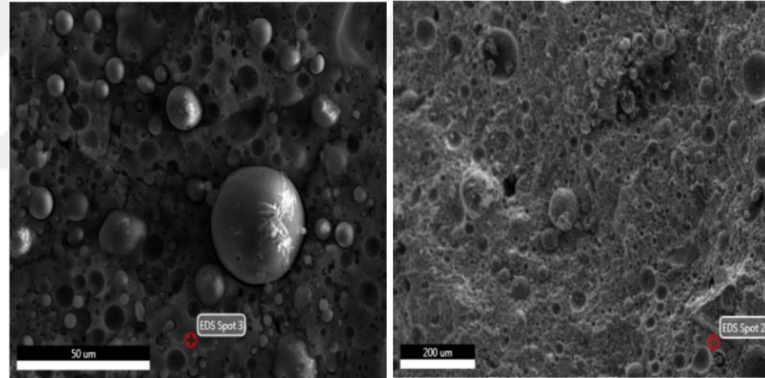
7.9 EDS Analizi

SEM incelemesi yapılan hamurlarda matrisi temsil eden noktalarda EDS nokta analizleri yapılmış ve o bölgede yer alan atomların ağırlıkça ve atomca mevcudiyet yüzdeleri belirlenmiştir. Bunlara ait görseller Şekil 7.52-7.55'te sunulmuştur. Genel anlamda değerlendirme yapıldığında uçucu kül esaslı hamurlarda O, Si, Al ve Na atomlarının çoğunlukta olduğu tespit edilmiştir. Cüruf esaslı hamurlarda ise cürufun yüksek CaO içeriğinin de bir sonucu olarak bu atomlara Ca atomlarının da eşlik ettiği görülmüştür.



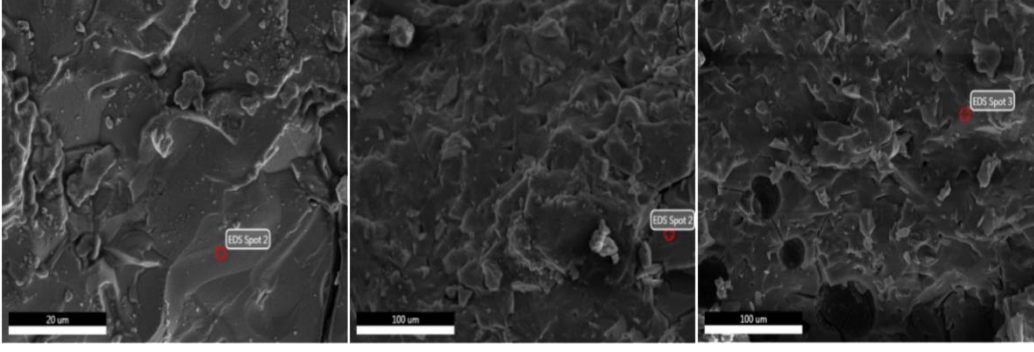
Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%
O	48.81	62.16	O	50.01	62.46	O	50.53	63.65
Na	14.35	12.72	Na	15.04	13.07	Na	12.90	11.31
Al	7.46	5.64	Al	7.38	5.46	Al	7.80	5.83
Si	23.92	17.35	Si	24.69	17.57	Si	23.23	23.23
Mo	1.46	0.31	Ca	2.88	1.43	Ca	2.46	2.46
Ca	1.48	0.54	Mo	-	-	Mo	2.02	2.02
Fe	1.48	0.54	Fe	-	-	Mg	1.08	1.08

Şekil 7.52 Sırasıyla U-1.5-10, U-1.5-10-P3/2, U-1.5-10-Nv/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.



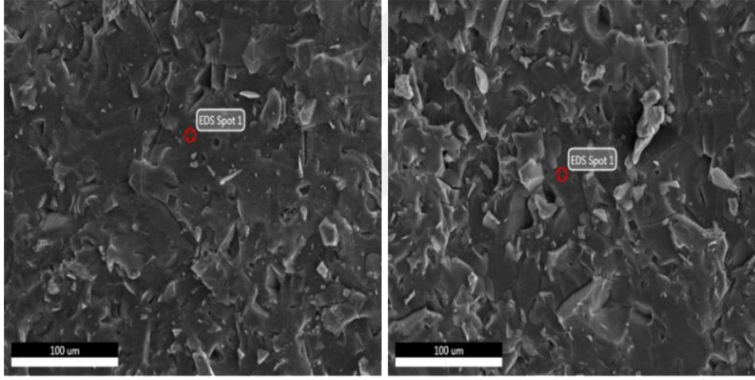
Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%
O	47.35	61.13	O	53.21	65.32
Na	13.47	12.10	Na	14.01	11.97
Al	7.39	5.66	Al	7.91	5.76
Si	23.5	17.28	Si	22.72	15.89
Ca	2.71	1.40	Ca	2.15	1.05
K	1.10	0.58	K	-	-
Fe	1.95	0.72	Fe	-	-

Şekil 7.53 Sırasıyla U-1.5-10-M/5, U-1.5-10-L/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.



Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%
C	55.62	73.51	O	53.49	67.56	O	37.62	58.25
O	11.39	11.31	Na	10.66	9.37	Na	-	-
Na	0.87	0.60	Al	3.60	2.70	Al	1.30	1.19
Al	0.97	0.57	Si	16.94	12.19	Si	10.65	9.39
Si	9.91	5.60	Ca	13.87	7	Ca	50.43	31.17
Ca	21.24	8.41	K	-	-	Mg	-	-
Fe	-	-	Fe	-	-	Fe	-	-

Şekil 7.54 Sırasıyla C-1.75-10, C-1.75-10-Nv/5 ve C-1.75-10-P3/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.

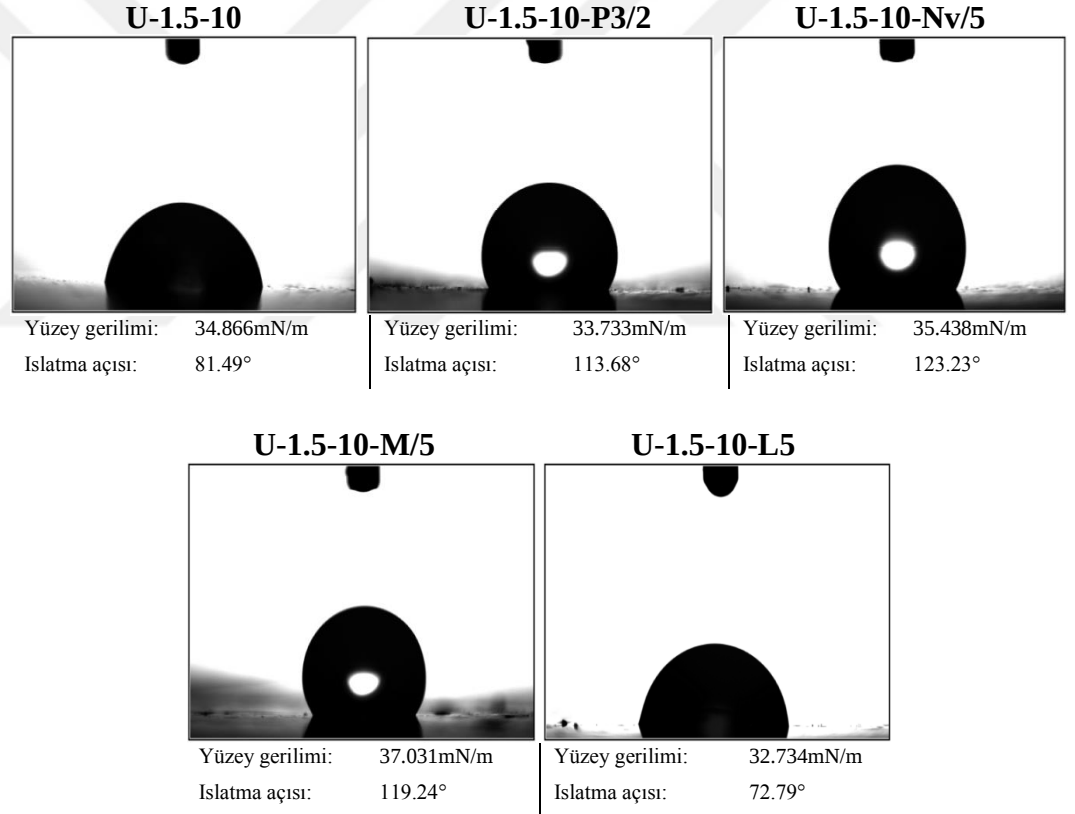


Element	Ağırlıkça%	Atomsal%	Element	Ağırlıkça%	Atomsal%
O	49.59	64.42	O	48.20	63.35
Na	9.77	8.83	Na	9.72	8.89
Al	4.09	3.15	Al	4.47	3.49
Si	17.17	12.71	Si	20.25	15.16
Ca	16.86	8.74	Ca	17.36	9.11
Mg	2.51	2.14	Mg	-	-
Fe	-	-	Fe	-	-

Şekil 7.55 Sırasıyla C-1.75-10-L/5 ve C-1.75-10-N/5 numunelerine ait EDS nokta analiz sonuçları.

7.10 Yüzey Gerilimi ve Temas Açısı Analizi

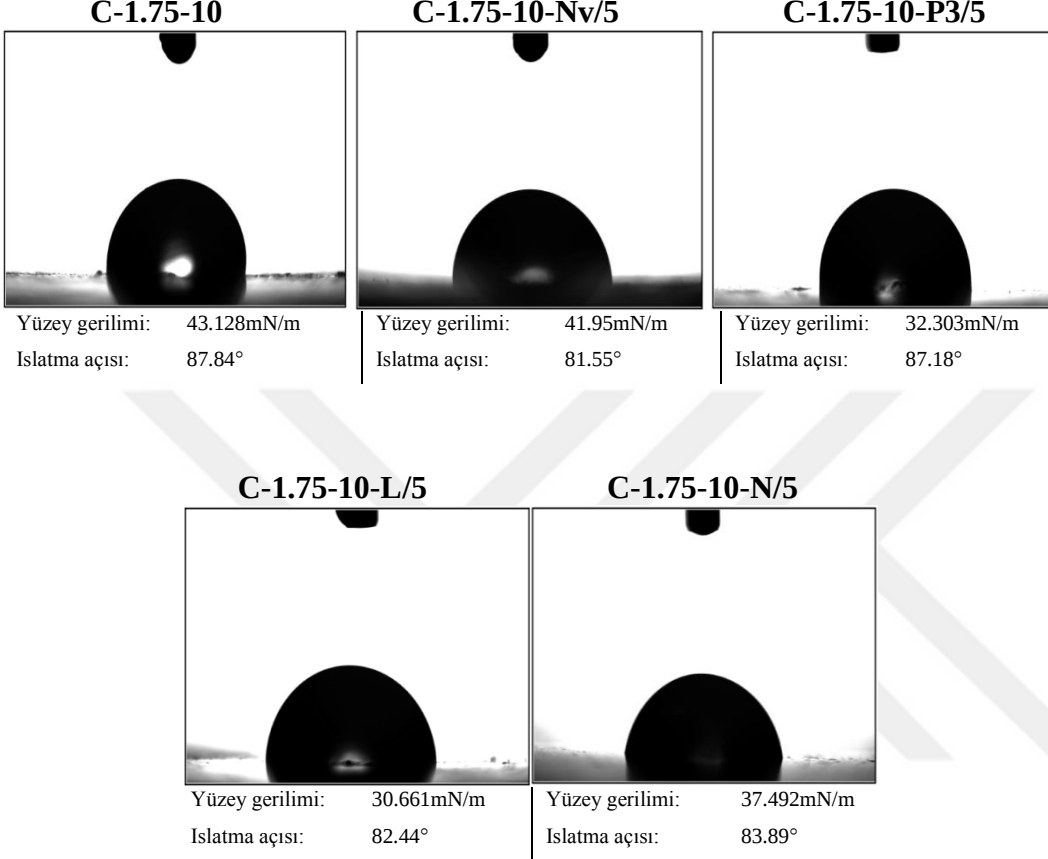
Şekil 7.56 ve Şekil 7.57’de hamur numuneler üzerinde gerçekleştirilen temas açısı deneyine ait fotoğraflar ve fotoğrafların hemen altında yüzey gerilimine dair sonuçlar gösterilmiştir. Hamurlar pürüzsüz bir yüzey elde edilmesi amacıyla silikon kalıplara dökülmüş olup altta kalan düz ve pürüzsüz yüzey deneylerde kullanılmıştır. Islatma açısı sonuçları incelendiğinde akışkanlaştırıcı katkı içeren U-1.5-10-P3/2, U-1.5-10-Nv/5 ve U-1.5-10-M/5 kodlu geopolimer hamur yüzeylerinin hidrofobik özellik kazandığı görülmektedir. U-1.5-10 kodlu numuneye ilave edilen lignin esaslı L5 akışkanlaştırıcısı ise hamurun hidrofilik özelliğini yükseltmiştir.



Şekil 7.56 Uçucu kül esaslı hamurlara ait yüzey gerilimi ve temas açıları.

Cüruf esaslı hamurlar üzerindeki deneyler ise bu numunelerin tamamının hidrofilik davranış sergilediğini göstermiştir. Katkı içeren karışımlar arasında en yüksek temas açısının elde edildiği karışım ise C-1.75-10-P3/5 kodlu numunedir.

Karışımlarda kullanılan sıvının yüzey gerilimi ölçümü uçucu kül grubunda sadece aktivatör ve akışkanlaştırıcı, cüruf grubunda ise aktivatör, akışkanlaştırıcı ve 15 g su ilavesiyle oluşturulan sıvı üzerinde yapılmıştır.



Şekil 7.57 Cüruf esaslı hamurlara ait yüzey gerilimi ve temas açıları.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kullanılan malzeme ve yöntemler dikkate alındığında;

- Cüruf esaslı harçların basınç ve eğilme dayanımlarının uçucu kül esaslı harçlardan daha yüksek olduğu,
- En yüksek basınç dayanımının elde edilmesini sağlayan aktivatör özelliklerinin alüminosilikat malzemeye göre değiştiği, uçucu kül esaslı geopolimerde 1.5 M_s oranı ve %10 Na₂O içeriğinin, yüksek fırın cürufu esaslı harçlarda ise 1.75 M_s oranı ve %10 Na₂O içeriğinin en uygun aktivatör karışımı olduğu ancak eğilme dayanımlarında buna paralel sonuçların elde edilmediği,
- Uçucu kül esaslı harçlarda en yüksek yayılma çapının elde edilmesini sağlayan katkının %2 kullanım dozajında polikarboksilat eter, cüruf esaslı harçlarda ise %5 kullanım dozajında naftalin vinil esaslı olduğu,
- Katkı kullanımı ile basınç dayanımlarının azaldığı, katkı miktarındaki yükseliş ile düşüş eğiliminin sürdüğü, bu durumun katkıda bulunan sudan ileri geldiği,
- Katkıdan karışıma giren suya eşit suyun referans karışıma eklenmesinin, yayılma çapı, basınç ve eğilme dayanımlarına genellikle katkı ilavesinden daha olumlu yansıdığı,
- Farklı katkılarla üretilen karışımlar ile referans karışımların yüksek sıcaklık direnci incelendiğinde cüruf esaslı harçların uçucu kül esaslı harçlardan daha yüksek basınç dayanımı kayıpları yaşadıkları,
- Katkı kullanımının genellikle priz sürelerini uzattığı ancak polikarboksilat eter esaslı katkılarda bu durumun tam tersinin geçerli olduğu,
- Kum içermediği için hamurların akışkanlıklarının yüksek olduğu, bu sebeple de geopolimer harçların Newtonyen davranışa yakın bir reolojik davranış gösterdikleri, ancak düşük de olsa bir kayma gerilmesine sahip oldukları için Bingham modeli ile modellenebileceği,

- Katkı kullanımının hem uçucu kül hem de cüruf esaslı hamurlarda referans karışıma kıyasla viskoziteyi düşürdüğü ancak bunun katkıdaki su miktarından kaynaklandığı, katkı ve katkıdan gelen su miktarına eşit su içeren hamurlar kıyaslandığında katkı içermeyen hamurlarda viskozitenin daha düşük olduğu,
- Çoğu su azaltıcı katkının geopolimer kristal yapısı üzerinde ciddi bir değişiklik yapmadığı,
- SEM incelemeleri neticesinde katkı ilavesinin hamur bünyesinde boşluk ve çatlak miktarını değiştirmek dışında ciddi bir değişikliğe neden olmadığı,
- Uçucu kül esaslı hamurlarda polikarboksilat eter, naftalin vinil ve melamin sülfonat ilavesinin referans karışıma kıyasla hidrofobik özelliği arttırdığı,
- Cüruf esaslı hamurlarda katkı ilave edilsin veya edilmesin tüm numunelerin hidrofilik özelliğe sahip olduğu,

sonuçlarına varılmıştır.

Deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığında

- Başlangıç malzemesine ilave edilen akışkanlaştırıcı tipinin nihai malzemenin sertleşmiş ve taze hal özelliklerine farklı etkilerinin söz konusu olması nedeniyle viskozite düzenleyici katkılarla birlikte kullanılması,
 - Reolojik ölçümlerin çalışma aralığının değiştirilerek 0.1-10 rpm aralığında yapılmasının katkı ilavesinin geopolimerler üzerindeki etkilerinin daha detaylı anlaşılmasına katkı sağlayacağı,
- düşünülmektedir.

REFERANSLAR

Afkhami, B., Akbarian, B., Beheshti, N., Kakaee, A. H., & Shabani, B., 2015, Energy consumption assessment in a cement production plant, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 10, 84-89.

Ahmed Ali, K., Ahmad, M. I., & Yusup, Y., 2020, Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector, *Sustainability*, 12(18), 7427.

Alhawati, M., Ashour, A., Yildirim, G., Aldemir, A., & Sahmaran, M., 2022, Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review, *Journal of Building Engineering*, 50, 104104.

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Salem, H. A., 2016, Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance, *Construction and Building Materials*, 121, 694-703.

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A., & Meikle, S., 2016, Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications, *Construction and Building Materials*, 120, 198-211.

Alnahhal, M. F., Kim, T., & Hajimohammadi, A., 2020, Evolution of flow properties, plastic viscosity, and yield stress of alkali-activated fly ash/slag pastes, *RILEM Technical Letters*, 5, 141-149.

Amritphale, S. S., Mudgal, M., Chouhan, R. K., Mishra, D., & Chandra, N., 2015, Novel process for the preparation of geopolymeric functional materials in a solid form, *US Patent 20150203405*.

Anaszewicz, Ł., 2021, Effect of Various Types of Superplasticisers on Consistency, Viscosity, Structure and Long-Term Strength of Geopolymer Products, *Materials*, 14(24), 7614.

ASTM C109, 2021, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars.

ASTM C125, 2021, Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates.

ASTM C33, 2018, Standard Specification for Concrete Aggregates.

ASTM C494, 2020, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete

ASTM C618, 2022, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

ASTM C807, 2021, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement Mortar by Modified Vicat Needle.

Bakharev, T., 2006, Thermal behaviour of geopolymers prepared using class F fly ash and elevated temperature curing, *Cement and Concrete Research*, 36(6), 1134-1147.

Baradan B., 2011, İnşaat mühendisleri için malzeme bilgisi, 4th baskı, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 307, 134-136.

Barbosa, V. F., Mackenzie, K. J. & Thaumaturgo, C., 2000, Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers, *International Journal of Inorganic Materials*, 2, 309-317.

Bhowmick A, Ghosh S., 2012, Effect of synthesizing parameters on workability and compressive strength of fly ash based geopolymer mortar, *International Journal of Civil Engineering*, 3(1):168–77.

Bockris, J. O. M., Khan, S. U., & Khan, S. U., 1993, Surface electrochemistry: a molecular level approach (Vol. 1), *Springer Science & Business Media*.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G., 2013, Materials Science and Engineering, 514, 38, 8.basım, ISBN:978-605-133-416-5, Utah and Iowa University.

Chindaprasirt P, Chareerat T, Sirivivatnanon V., 2007, Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer, *Cement Concrete Composites*, 29:224–9.

Collepardi, 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.

Criado, M., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Banfill, P. F. G., 2009, Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology, *Rheologica Acta*, 48(4), 447-455.

Davidovits J., 1991, Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, ;37:1633-1656

Davidovits J., 1994, Properties of geopolymer cements, *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 131-149pp.

Davidovits J., 2011, Geopolymer Chemistry & Applications 3rd ed., Institute Geopolymere, France, Saint-Quantin, part1, page12.

Davidovits, J., 1991, Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656.

Davidovits, J., 1993, Geopolymer cements to minimize carbon dioxide greenhouse warming, *Ceramic Transactions*, 37(1), 165-182.

Davidovits, J., 2002, Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs, *In Geopolymer 2002 Conference*, France, Saint Quentin (Vol. 28, p. 29).

Deb, P. S., Nath, P. & Sarker, P. K., 2014, The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Materials & Design*, 62, 32-39.

Dong, M., Elchalakani, M., & Karrech, A., 2020, Development of high strength one-part geopolymer mortar using sodium metasilicate, *Construction and Building Materials*, 236, 117611.

Duxson P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S., 2007, Geopolymer technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933.

Endo, M., Takeda, T., Kim, Y. J., Koshihara, K., & Ishii, K., 2001, High power electric double layer capacitor (EDLC's); from operating principle to pore size control in advanced activated carbons. *Carbon Letters*, 1(3_4), 117-128.

Erdoğan, Ş., Kurbetçi, Ş., Kandil, U., Nas, M., Nayır, S., 2017, Çimento-katkı uyumu açısından silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkıların bileşik etkisi, TMMOB, *Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5. Sempozyum ve Sergisi*, bildiriler kitabı.

European Environment Agency, www.eea.europa.eu (Erişim Tarihi: 30.06.2022)

Fernández-Jiménez A., Palomo, A., Criado, M., 2005, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204-1209.

Firdous, R., & Stephan, D., 2019, Effect of silica modulus on the geopolymerization activity of natural pozzolans, *Construction and Building Materials*, 219, 31-43.

Gartner Ellis, 2004, Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements, *Cement and Concrete Research*, 34.9, 1489-1498.

Gelardi, G., & Flatt, R. J., 2016, Working mechanisms of water reducers and superplasticizers, *In Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 257-278). Woodhead publishing.

Glukhovsky V.D., 1959, Soil silicates, Kiev, USSR: Gostroiizdat.

Glukhovsky, V.D., 1994, Ancient, modern and future concretes, 1st *International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Krivenko, P.V. (Eds.), Kiev, Ukraine, 131-149pp.

Hackley, V.A. and Ferraris, C.F., 2001, The use of nomenclature in dispersion science and technology, *NIST Recommended Practice Guide*, special publication (960-3), Washington: National Institute of Standards and Technology. 72 pages.

Heath, A., Goodhew, S., Paine, K., Lawrence, M. & Ramage, M., 2013, The potential for using geopolymer concrete in the UK, *Proceedings of the ICE - Construction Materials*, 166, 195-203.

Hewlett, P., & Liska, M., 2019, Lea's chemistry of cement and concrete. Butterworth-Heinemann.

Humanity Development Library 2.0, 2022, Seger formula, <http://www.nzdl.org>, (Erişim Tarihi: 21.06.2022)

Huseien, G.F., Mirza, J., Ismail M., Hussin, M.W., 2016, Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash, *Construction and Building Materials*, 125:1229–40.

International Energy Agency (IEA), Direct CO₂ intensity of cement production in the Net Zero Scenario, 2015-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-of-cement-production-in-the-net-zero-scenario-2015-2030>(Erişim Tarihi: 30.06.2022)

Jumrat, S., Chatveera, B., Rattanadecho, P., 2011, Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar, *International Communications Heat Mass Transfer*, 38(2):242–8.

Katkı Üreticiler Birliği (KÜB), 2021, Beton katkıları sektör raporu, www.kub.org.tr, (Erişim Tarihi: 11.07.2022)

Kolezynski, A., Krol, M., & Zychowicz, M., 2018, The structure of geopolymers–Theoretical studies. *Journal of Molecular Structure*, 1163, 465-471.

Krivenko, P.V., 1994, Alkaline cement, *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, 11pp.

Kumar, R., Kumar, S., & Mehrotra, S. P., 2007, Towards sustainable solutions for fly ash through mechanical activation. Resources, *Conservation and Recycling*, 52(2), 157-179.

Kurtuluş, C., & Başpınar, M. S., 2020, Development of efflorescence control methods of fly ash based foam geopolymers, *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, AKÜ FEMÜBİD 20 (2020) 015705 (129-137).

Laskar, A. I., & Bhattacharjee, R., 2013, Effect of Plasticizer and Superplasticizer on Rheology of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete, *ACI Materials Journal*, 110(5).

Laskar, S.M., Talukdar, S., 2017, Development of ultrafine slag-based geopolymer mortar for use as repairing mortar, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5):1–11.

Lewis, J. A., 2000, Colloidal processing of ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 83(10), 2341-2359.

Malinowsky R., 1979, Concretes and mortars in ancient aqueducts. *Concrete International*, 1:66–76.

Malkawi, A. B., Nuruddin, M. F., Fauzi, A., Almattarneh, H., & Mohammed, B. S., 2016, Effects of alkaline solution on properties of the HCFA geopolymer mortars. *Procedia Engineering*, 148, 710-717.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M., 2006, Concrete microstructure, properties, and materials, 3. baskı, McGraw-Hill.

Mikuni, A., Komatsu, R., & Ikeda, K., 2007, Dissolution properties of some fly ash fillers applying to geopolymeric materials in alkali solution, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2953-2957.

Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D., 2003, Concrete, Prentice-Hall, Pearson Education Inc., 2. baskı, 644 p.

Moghim, S., Keser E.H., & Ramyar K., 2022, Effect of binary and ternary binders on flow and strength of cement mortar, *Journal of Cement Based Composites*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.36937/CEBACOM.2022.5626>

Neupane, K., Chalmers, D., & Kidd, P., 2018, High-strength geopolymer concrete-properties, advantages and challenges, *Advances in Materials*, 7(2), 15-25.

Newlands, K.C., Foss, M., Matchei, T., Skibsted, J., & Macphee, D. E., 2017, Early stage dissolution characteristics of aluminosilicate glasses with blast

furnace slag-and fly-ash-like compositions, *Journal of the American Ceramic Society*, 100(5), 1941-1955.

Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. and Jalali, S., 2008, Alkali-activated binders: A review part 1. historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22:1305-1314pp.

Panagiotopoulou, C., Kontori, E., Perraki, T., & Kakali, G., 2007, Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, *Journal of Materials Science*, 42(9), 2967-2973.

Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J., 2009, Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications. Elsevier.

Rabie, M., Irshidat, M. R., & Al-Nuaimi, N., 2020, Effect of alkaline activators on the mechanical properties of geopolymer mortar, *International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC 2020)*, February 2-5, 2020 Doha, Qata, 377–381. <https://doi.org/10.29117/cic.2020.0048>

Reddy, M.S., Dinakar, P. and Rao, B.H., 2016, A review of the influence of source material's oxide composition on the compressive strength of geopolymer concrete, *Microporous and Mesoporous Materials*, 234:12-23pp.

Rickard, W. D., Williams, R., Temuujin, J., and Van Riessen, A., 2011, Assessing the suitability of three Australian fly ashes as an aluminosilicate source for geopolymers in high temperature applications, *Materials Science and Engineering, A*, 528(9), 3390-3397.

Rubio-Hernández, F. J., 2018, Rheological behavior of fresh cement pastes. *Fluids*, 3(4), 106.

Samarakoon M. H., Ranjith P. G., Duan W. H., 2020, V.R.S. De Silva, Properties of one-part fly ash/slag-based binders activated by thermally-treated

waste glass/NaOH blends: a comparative study, *Cement and Concrete Composites*, 112 103679, [https:// doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103679](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103679).

Scrivener, Karen L., and R. James Kirkpatrick, 2008, Innovation in use and research on cementitious material, *Cement and Concrete Research* 38.2, 128-136.

Sharma, A., Singh, P., & Kapoor, K., 2022, Utilization of recycled fine powder as an activator in fly ash based geopolymer mortar, *Construction and Building Materials*, 323, 126581.

Sitarz, M., Urban, M., & Hager, I., 2020, Rheology and mechanical properties of fly ash-based geopolymer mortars with ground granulated blast furnace slag addition, *Energies*, 13(10), 2639.

Skvara, F., Slosar, J., Bohunek, J., & Markova, A., 2003, Alkali-activated fly ash geopolymeric materials. In *Proceedings of the 11th International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC)*, 661-667p.

Speight J.G., Nobert A. L., 2005, Lange's handbook of chemistry, Vol. 1., McGraw-Hill New York.

Srividya, T., PR, K. R., Sivasakthi, M., Sujitha, A., & Jeyalakshmi, R., 2022, A state-of-the-art on development of geopolymer concrete and its field applications. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00812.

TS EN 934-2+A1, 2013, Kimyasal katkıları – Beton, harç ve şerbet için – Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları – Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.

Tuyan, M., Andiç-Çakir, Ö., & Ramyar, K., 2018, Effect of alkali activator concentration and curing condition on strength and microstructure of waste clay brick powder-based geopolymer, *Composites Part B: Engineering*, 135, 242-252.

Türkiye Çimento Muhtasiller Birliği(TÇMB), İstatistikler, <https://www.turkcimento.org.tr/tr/istatistikler/aylik-veriler>, (Erişim Tarihi: 30.06.2022)

Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C., 2007, Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), 506-513.

W.K.W. Lee, J. S. J. Van Deventer, 2002, The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements, *Cement and Concrete Research*, 32, 577–584.

Wang, C., Kayali, O., & Liow, J. L., 2019, Effect of electrostatic repulsion induced by superplasticizers on the flow behaviour of fly ash pastes, 5th *International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, University of New South Wales.

Wei, Z., Hu, Y., Han, H., Sun, W., Wang, R., Sun, W., Wang, J., Gao, Z., Wang, L., Zhang, C., Sun, L., & Liu, R., 2019, Selective separation of scheelite from calcite by self-assembly of H₂SiO₃ polymer using Al³⁺ in Pb-BHA flotation, *Minerals*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/min9010043>

Xiong, G., & Guo, X., 2022, Effects and mechanism of superplasticizers and precursor proportions on the fresh properties of fly ash–slag powder based geopolymers, *Construction and Building Materials*, 350, 128734.

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J., 2000, The geopolymerisation of alumino-silicate mineral, *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247-266.

Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S., 2008, Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, 38(4), 554-564.

Zhang, H.-Y., Liu, J.-C., Wu, B.O., 2021, Mechanical properties and reaction mechanism of one-part geopolymer mortars, *Construction and Building Materials*, 273 121973, [https:// doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121973](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121973).

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H., 2014, Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, *Construction and Building Materials*, 56, 113-127.

Zhu, H., Hua, S. & Chen, Y., 2009, Activating process of geopolymer source material: Kaolinite, *Journal of Wuhan University of Technology-Materials. Science Edition.*, 24, 132-136.



TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince gerekli malzemelerin ve verilerin sağlanmasında kolaylık gösteren özellikle kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen kadirşinas danışmanım Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a ve tezin biçimlenmesinde elinden gelenin fazlasını sunan değerli katkılarını aldığım hocam Dr. Adil GÜLTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Bu tez çalışması FYL-2021-22788 proje kodu ile Bilimsel Araştırma Proje birimi tarafından fonlanmıştır. Desteklerinden ötürü BAP birimimize teşekkür ederim.

27/10/2022

Hasan Erinç KESER

