

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

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN**  
**CÜRUFU BAĞLAYICILI LİFLİ KOMPOZİT**  
**GELİŞTİRİLMESİ**

**Serdar AYDIN**

**Ocak, 2010**  
**İZMİR**

**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN  
CÜRUFU BAĞLAYICILI LİFLİ KOMPOZİT  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Doktora Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

**Serdar AYDIN**

**Ocak, 2010**

**İZMİR**

## DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**SERDAR AYDIN** tarafından **PROF. DR. BÜLENT BARADAN** yönetiminde hazırlanan “**ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI LİFLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bülent BARADAN

Danışman

Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. İ. Akın ALTUN

Tez İzleme Komitesi Üyesi

Prof. Dr. Turan ÖZTURAN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Hulusi ÖZKUL

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Bilimsel bilgi birikimi ve tecrübeleriyle beni destekleyen ve yönlendirici rehberliği ile çalışmalarına değer kazandıran değerli hocam ve danışmanım Sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN'a sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca bana zaman ayırarak ilgilerini esirgemeyen ve değerli fikirleri ile çalışmalarına katkıda bulunan Tez İzleme Komitesi Üyeleri Sayın Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a ve Sayın Prof. Dr. İ. Akın ALTUN'a bu vesile ile çok teşekkür ederim.

Ege Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı imkanlarından yararlanmama olanak sağlayan ve tecrübelerini paylaştan Sayın Yrd. Doç. Dr. Şemsi YAZICI'ya, deneysel çalışmaların yürütülmesindeki yardım ve katkılarından dolayı Sayın Dr. Hüseyin YİĞİTER ve Sayın Dr. Burak FELEKOĞLU başta olmak üzere, Sayın Dr. Erkan GÜLER'e, Sayın Maden Müh. Ebru ÖZPEK'e, Sayın İnş. Yük. Müh. Giray ALPTUNA'ya, Sayın Gökhan ERDOĞAN'a, Sayın Duygu OĞUZ KILIÇ'a, Sayın Mine BAHÇECİ'ye ve Sayın Evrim YAKUT'a, desteklerinden ötürü Sayın Doç. Dr. Selçuk TÜRKEL'e, Sayın Doç. Dr. Halit YAZICI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mert YARDIMCI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Kamile TOSUN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali TOPAL'a ve Sayın Dr. Barış YILMAZ'a teşekkür ederim.

Maddi destekleri için Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine (2009 KB.FEN 009), malzeme destekleri için KARÇİMSA Çimento A.Ş.'ye, POMZA Export A.Ş.'ye, BEKSA A.Ş.'ye, BASF Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye ve BURSA Beton A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, tüm yaşamım boyunca maddi ve manevi her konuda desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz minnettarlıklarımı sunarım.

Serdar AYDIN

## ALKALİLERLE AKTİVE EDİLMİŞ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU BAĞLAYICILI LİFLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ

### ÖZ

Yüksek performanslı bağlayıcılar, üstün özelliklere sahip harç, beton ve lifli kompozit malzemelerin üretiminde vazgeçilmez malzemelerdir. Özellikle yüksek performanslı lifli kompozitler (RPC ve SIFCON gibi) arzu edilen performansa erişebilmek açısından oldukça yüksek dayanımlı bir bağlayıcıya gereksinim duymaktadır. Bu nedenle, bu kompozitlerin üretiminde çok yüksek miktarda (800-1000 kg/m<sup>3</sup>'e çıkan) çimento kullanılmaktadır. Bu derece yüksek miktarda çimento kullanımı ise birçok teknik, ekonomik ve çevresel sorunları da beraberinde getirmektedir.

Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi amorf karakterli malzemeler bir aktivatör vasıtasıyla aktive edilerek bir bağlayıcıya dönüştürülebilmektedir. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda çimento esaslı bağlayıcılardaki C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır.

Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb.) ve çevrenin daha az tahribi (doğal kaynaklar yerine atıkların kullanımı ile) gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama problemleri de azalmaktadır. Bu bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek dayanım, daha düşük hidratasyon ısısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi birçok önemli teknik avantaja sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, amorf karakterli bir malzeme olan yüksek fırın cürufu sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilerek yüksek performanslı bağlayıcı

üretilmesi amaçlanmıştır. İlk aşamada, farklı kür koşulları altında (standart su, buhar ve otoklav kürü) en uygun aktivatör çözeltisi ( $M_s$  oranı ( $SiO_2/Na_2O$ ) ve  $Na_2O$  içeriği bakımından) araştırılmıştır. Karışım özelliklerini geliştirmeye yönelik olarak yüksek fırın cürufu yerine, belirli oranlarda uçucu kül, silis dumanı, metakaolin, alçı ve bazı kimyasal katkıların (hava sürükleyici, büzülme önleyici ve köpük önleyici) kullanım olanakları araştırılmıştır. Sonuç olarak Portland çimentosu kullanılmadan basınç dayanımı 200 MPa'ın üzerinde olan ARPC (Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Üretilmiş Reaktif Pudra Betonu) adı verilen bazı özellikleri RPC'den üstün yüksek performanslı lifli kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozitin reolojik, mekanik ve mikroyapı (SEM, XRD, termal analiz, cıva porozimetresi vb.) özellikleri belirlenmiş, elde edilen sonuçlar Portland çimentosu esaslı Klasik RPC (KRPC) karışımı ile kıyaslanmıştır. Son olarak, bu kompozitin çeşitli dış etkilere karşı dayanıklılığı KRPC ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçları, her iki RPC karışımının da dış etkilere karşı dayanıklılığının oldukça iyi olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, genel olarak ARPC'nin dış etkilere karşı dayanıklılığının KRPC'den daha iyi olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Alkali aktivasyon, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, reaktif pudra betonu, durabilite, içyapı incelemeleri.

# **DEVELOPMENT OF A FIBER REINFORCED COMPOSITE WITH ALKALI ACTIVATED GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG**

## **ABSTRACT**

High performance binders are indispensable materials in the production of mortar, concrete and fibre reinforced composites with superior high mechanical and durability properties. High performance fibre reinforced composites (such as RPC and SIFCON) require high strength binders to achieve desirable properties. Cement content of these composites may be as high as 800 - 1000 kg/m<sup>3</sup>. Such a high cement content may cause several technical, economical and environmental problems.

Materials that have amorphous structure such as fly ash and slag can be modified to a strong binder by using some activators. The product of modification reaction of type F fly ashes is an inorganic polymer called geopolymer. While the main reaction product of glassy blast furnace slag is a hydrated calcium silicate, similar to the C-S-H structure of a cementitious binder.

Alkali-activated binders are characterized by their high mechanical performance, low energy cost and low pollutant gases emission (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.) as well as their less environmental deterioration (almost exclusively usage of secondary raw materials instead of surface-excavated natural resources). Related to the properties and characteristics of alkali - activated binders and concretes, some advantages with respect to the traditional Portland cements and concretes such as earlier and higher strengths, lower heat of hydration and better resistance to aggressive chemicals are worth mentioning.

The object of this research was to develop a high performance binder by modifying ground granulated blast furnace slag by NaOH and water glass solutions. Optimum activator concentration has been investigated with respect to M<sub>s</sub> ratio (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) and Na<sub>2</sub>O content under various curing conditions (normal water curing, low pressure steam curing and autoclave curing). Silica fume, fly ash,

metakaolin, plaster of Paris and some chemical admixtures (air entraining, shrinkage reducing admixture and anti-foam agent) were also tried in the mixtures besides slag in order to improve the properties of composite. As a result, an alkali activated steel fiber incorporated composite ARPC, having a compressive strength over 200 MPa was developed. Rheological, mechanical, micro structural (SEM, XRD, thermal analysis, mercury porozimeter etc.) and durability properties of ARPC were determined and compared with the conventional RPC (KRPC). Test results indicate that both of the RPC mixtures have desirable durability properties. Additionally, ARPC generally exhibits better durability properties than KRPC.

**Keywords:** Alkali activation, ground granulated blast furnace slag, silica fume, reactive powder concrete, durability, microstructure investigation.



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	vi
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - ALKALİLERLE AKTİVASYON SİSTEMLERİ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Tarihsel Gelişimi.....	4
2.2 Tipleri ve Kullanım Alanları.....	5
2.3 Kompozisyon ve Hidratasyon Ürünlerinin Karakterizasyonu .....	7
2.4 Alkalın Aktivatörler .....	12
2.5 Değişik Katkıların Kullanımı.....	15
<b>BÖLÜM ÜÇ - ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI BAĞLAYICILARIN ÖZELLİKLERİ ...</b>	<b>17</b>
3.1 Hidratasyon Ürünleri.....	25
3.2 YFC Yerine Diğer Malzemelerin İkamesi ile Oluşturulan Sistemler .....	27
3.2.1 YFC-PÇ Sistemleri .....	27
3.2.2 YFC-KÇ Sistemleri.....	27
3.2.3 YFC-SD Sistemleri .....	29
3.2.4 YFC-UK Sistemleri.....	30
3.3 İşlenebilirlik .....	32
3.4 Kür Koşulları.....	34
3.5 Agrega-Hamur Ara Yüzeyi .....	35
3.6 Alkalilerle Aktive Edilmiş YFC Bağlayıcıların Sorunlu Yönleri .....	36
3.6.1 Kuruma Büzülmesi.....	36
3.6.2 Priz Süresi .....	40
3.7 Uygulama Alanları .....	43

**BÖLÜM DÖRT - ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN BAĞLAYICILARIN DIŞ ETKİLERE DAYANIKLILIĞI..... 48**

4.1 Sülfat Etkisi.....	48
4.2 Asit Etkisi.....	50
4.3 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR).....	53
4.4 Karbonatlaşma.....	56
4.5 Klorür Difüzyonu.....	57
4.6 Donatı Korozyonu.....	58
4.7 Aşınma Dayanıklılığı.....	59
4.8 Donma-Çözülme Dayanıklılığı.....	60
4.9 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı.....	61

**BÖLÜM BEŞ - KULLANILAN MALZEMELER ve YÖNTEM ..... 63**

5.1 Kullanılan Malzemeler.....	63
5.1.1 Yüksek Fırın Cürufu (YFC).....	63
5.1.2 Çimento (PÇ).....	64
5.1.3 Mineral Katkılar.....	65
5.1.4 Agrega.....	67
5.1.5 Sodyum Hidroksit ve Cam Suyu.....	68
5.1.6 Akışkanlaştırıcı Katkı.....	68
5.1.7 Çelik Lif.....	68
5.2 Yöntem.....	68
5.2.1 Karışımların Hazırlanması.....	68
5.2.2 İşlenebilirlik Deneyleri.....	69
5.2.3 Reolojik Ölçümler.....	70
5.2.4 Priz Sürelerinin Belirlenmesi.....	71
5.2.5 Basınç ve Eğilme Deneyleri.....	71
5.2.6 Kuruma Büzülmesi.....	72
5.2.7 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Geçirimli Boşluk Oranı Tayini	72
5.2.8 Tokluk ve Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi.....	73
5.2.9 Silindir Yarma Deneyi.....	75
5.2.10 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı.....	75

5.2.11 Çelik Donatıya Aderans .....	76
5.2.12 Mikroyapı İncelemeleri .....	77
5.2.13 Dayanıklılık Deneyleri .....	78
5.2.13.1 Çözünme deneyi (Leaching) .....	78
5.2.13.2 Çiçeklenme deneyi.....	79
5.2.13.2 Alkali silika reaksiyonu (ASR) .....	80
5.2.13.3 Sülfat etkisi.....	80
5.2.13.4 Sülfürik asit etkisi .....	80
5.2.13.5 Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi .....	80
5.2.13.6 Korozyon deneyleri .....	81
5.2.13.7 Karbonatlaşma .....	86
5.2.13.8 Aşınma deneyi .....	86
5.2.13.9 Darbe deneyi.....	87
5.2.13.10 Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık deneyi .....	88
5.2.13.11 Donma-çözülme deneyi .....	89
5.3 Hazırlanan Karışımlar .....	89
5.3.1 Birinci Aşama Deneyler.....	90
5.3.2 İkinci Aşama Deneyler.....	92
5.3.3 Üçüncü ve Dördüncü Aşama Deneyler.....	95
<b>BÖLÜM ALTI - I. AŞAMA - OPTİMUM AKTİVATÖR DOZAJININ</b>	
<b>BELİRLENMESİ.....</b>	<b>96</b>
6.1 İşlenebilirlik .....	96
6.2 Priz Süresi .....	97
6.3 Mekanik Özellikler.....	99
6.3.1 Standart Su Kürü .....	99
6.3.2 Buhar Kürü.....	109
6.3.3 Otoklav Kürü.....	112
6.3.4 Otoklav ve Buhar Kürünün Mekanik Özelliklere Etkisinin Kıyaslanması ..	114
6.4 Kuruma Büzülmesi.....	118
6.5 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Bağlantılı Boşluk Oranları.....	124
6.6 Mikroyapı İncelemeleri .....	132
6.7 Birinci Aşama Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	158

**BÖLÜM YEDİ - II. AŞAMA - KARIŞIM ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ..... 160**

7.1 Amaç .....	160
7.2 Mineral Katkı ve Alçı Etkisi .....	161
7.3 Kimyasal Katkı Etkisi .....	164
7.4 Dayanım Üzerinde Etkin Parametrelerin Araştırılması .....	167
7.5 Yüksek Dayanımlı Kompozit Üretimi .....	170
7.5.1 Optimum Silis Dumanı İçeriğinin Belirlenmesine Yönelik Deneyler ....	170
7.5.2 Potansiyel Olarak Elde Edilebilecek En Yüksek Basınç Dayanımının Araştırılması.....	181
7.5.3 Daha Ekonomik RPC Benzeri Kompozit Malzeme Üretimine Yönelik Deneyler .....	182
7.6 Lif Boyu ve Dozajının Etkisi .....	185
7.7 II. Aşama Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	192

**BÖLÜM SEKİZ - GELİŞTİRİLEN KARIŞIMIN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ..... 194**

8.1 Taze Hal Özellikleri ve Reolojik Ölçümler .....	195
8.1.1 Statik Reolojik Parametrelerin Belirlenmesi.....	195
8.1.2 Akma Eğrilerinin Belirlenmesi .....	198
8.2 Mekanik Özellikler.....	205
8.3 Kırılma Enerjisi.....	206
8.4 Çelik Donatıya Aderans .....	209
8.5 Boyutsal Stabilite .....	209
8.6 Mikroyapı İncelemeleri .....	211
8.6.1 Kırık Yüzey İncelemeleri.....	211
8.6.2 Parlak Yüzey İncelemeleri .....	217
8.6.3 XRD İncelemeleri .....	225
8.6.4 DTA-TGA-DTG İncelemeleri .....	226
8.6.5 Boşluk Boyutu Dağılımı İncelemeleri .....	230
8.7 III. Aşama Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	231

<b>BÖLÜM DOKUZ - GELİŞTİRİLEN KARIŞIMIN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ.....</b>	<b>233</b>
9.1 Çözünme .....	234
9.2 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Geçirimli Boşluk Miktarları .....	236
9.3 Çiçeklenme.....	239
9.4 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR).....	239
9.5 Sülfat Etkilerine Dayanıklılık .....	243
9.5.1 Sodyum Sülfat Etkisine Dayanıklılık.....	243
9.5.2 Magnezyum Sülfat Etkisine Dayanıklılık .....	249
9.6 Sülfürik Asit Etkisine Dayanıklılık.....	257
9.7 Hızlı Klorür İyonu Geçirimsizliği .....	264
9.8 Çelik Donatının Korozyonu .....	266
9.9 Karbonatlaşma.....	271
9.10 Aşınma Dayanıklılığı .....	272
9.11 Darbe Etkilerine Dayanıklılık .....	273
9.12 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklılık .....	276
9.13 Donma-Çözülme Etkilerine Dayanıklılık .....	290
9.14 Dördüncü Aşama Deneylemlerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	291
<b>BÖLÜM ON - GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....</b>	<b>293</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>299</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>315</b>

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Çimento üretimi, gerek üretiminde kullanılan ham maddeler, gerekse üretimi esnasında açığa çıkan gazlar nedeniyle doğal yapıya zarar vermekte ve çevreyi kirletmektedir. Ülkemiz çimento sektörünün Avrupa Birliğine uyum çalışmaları sırasında karşılaştığı en önemli sorun CO<sub>2</sub> gazları emisyonudur. Çimentolu kompozitlerin bir diğer olumsuz yönü ise, birçok dış etkiye karşı yeterli dayanıklılığı gösterememesidir. Ayrıca, bazı durumlarda Portland çimentosu kullanımı ekonomik olmamaktadır. Söz konusu teknik, ekonomik ve çevresel problemler, çimento dışı bir bağlayıcı madde üretimini ilgi çekici hale getirmektedir.

Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretime yönelik çalışmalardan en ilgi çeken, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi endüstriyel atıkların alkalilerle aktivasyonudur. Esasen, çeşitli atıklar günümüzde çimento ve beton üretiminde Portland çimentosu yerine belirli oranlarda zaten kullanılmaktadır. Ancak, beton üretiminde kullanılmasında sakınca olmayan açığa çıkan endüstriyel atıkların miktarının oldukça önemli boyutlarda olması nedeniyle atıkların tamamının bu yolla tüketilmesi mümkün değildir. Bu yolla açığa çıkan maddenin ancak %20-30'u tüketilebilmektedir. Bu durum, çevresel kirliliğin yanında, depolama problemleri ve bunun getirdiği teknik ve ekonomik problemlere yol açmaktadır.

UK ve YFC gibi yapısında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> ve CaO içeren amorf malzemelerden alkali aktivatör sistemleri kullanılarak kuvvetli bir bağlayıcı madde üretimi mümkündür. Alüminosilikat uçucu küllerin aktivatörlerle reaksiyonu sonucunda “geopolimer” adı verilen amorf yapıdaki inorganik polimerler oluşurken, yüksek fırın cürufunun reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeline benzer hidrate kalsiyum silikat oluşmaktadır. Alkali aktivasyonu ile üretilen bağlayıcıların kullanımı, yüksek mekanik performans, düşük enerji giderleri, düşük kirletici gaz emisyonları (CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> vb.) ve çevrenin daha az tahribi gibi avantajlar sunmaktadır. Ayrıca, büyük ölçüde atık malzemelerin kullanımıyla, atıkların çevreye verdiği zararlar ve depolama sorunları önemli ölçüde azalacaktır.

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar, normal Portland çimentoları ve betonlarına göre erken ve daha yüksek mekanik dayanım, daha düşük hidrasyon ısı ve agresif kimyasallara karşı daha iyi dayanıklılık gibi bazı önemli avantajlara sahiptir. Bunun yanında, ani priz, mikro çatlak oluşumu ile yüksek büzülme ve çiçeklenme gibi bazı dezavantajları vardır.

Alkali aktivasyon yönteminde, aktive edilecek hammaddenin tipine bağlı olarak farklı mikroyapıya sahip farklı reaksiyon ürünleri oluşmaktadır. Bu farklılıklardan dolayı, alkali aktivasyon prosesi iki farklı model ile tanımlanmaktadır. İlk model CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO dördü sistemli olup, CaO açısından zengindir. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı yaklaşık 3'tür. İkinci modelde orijinal malzeme düşük CaO içeriğine (ağırlıkça %1'den daha düşük), yüksek SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı yaklaşık 1,3) sahiptir (Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso ve Vazquez, 2000).

İlk model genellikle camsı YFC'nin alkali aktivasyonuna işaret etmektedir. Ana reaksiyon ürünü, C-S-H jeline benzer hidrate kalsiyum silikattır. Bu faz Portland çimentosunun hidrasyonunda oluşandan farklı olup, Ca/Si oranı daha düşüktür. Diğer fazların veya hidrate bileşenlerin oluşumu, kullanılan aktivatörün tipine ve miktarına, cürufun yapısına ve kompozisyonuna ve kür koşullarına bağlıdır. İkinci modelde aktivasyona maruz kalacak malzeme, alüminosilikat uçucu küllerdir. Bu aktivasyonda reaksiyon sıcaklığı önemli bir rol oynar. Ortam sıcaklığında reaksiyon hızı çok düşüktür. Bununla birlikte, 40 ila 85 °C arasındaki sıcaklıklarda kür ile reaksiyon hızı önemli derecede artar ve 2 saatte 20 MPa'a ulaşan dayanımlar elde edilebilir. Bu durumda oluşan reaksiyon ürünleri, hidrate alümino silikat zincirlerince oluşturulan negatif yükleri alkalın iyonlarınca dengelenmiş amorf yapıdaki inorganik polimerdir. Oluşan polimer yapı kullanılan aktivatöre bağlıdır (Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso ve Vazquez, 2000).

Rusya ve Çin'de yayınlanan sonuçlar, basınç dayanımı için en iyi sonuçların cam suyu çözeltilisi (sıvı sodyum silikat) ile aktive edilmiş YFC betonlarından elde edildiğini göstermiştir. Çin'de cam suyu ile aktive edilmiş YFC betonlarında,

herhangi bir ısıtma işlemi veya özel katkı kullanmaksızın 60 ile 150 MPa arasında basınç dayanımı elde edilmiştir (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999a).

Bu tez çalışması kapsamında, ülkemizde açığa çıkan YFC'nin alkalilerle aktivasyonu ile bir bağlayıcı üretilmesi amaçlanmıştır. YFC'nin kompozisyonuna bağlı olarak kullanılması gereken aktivatör tipi, dozajı vb. faktörler elemanların özelliklerini büyük ölçüde değiştirmektedir. Çalışmanın ilk aşamasında, priz süresi, işlenebilirlik gibi taze hal özelliklerinin yanı sıra, farklı kür koşulları altında değişik aktivatör çözeltileri kullanılarak, değişik kür durumları için mekanik özellikler ve boyutsal stabilite bakımından uygun aktivatör dozajı araştırılmıştır. İkinci aşamada, boyutsal stabilite ve mekanik özelliklerin geliştirilmesi amacıyla çeşitli mineral (F ve C sınıfı uçucu kül, metakaolin, silis dumanı) ve kimyasal katkıların (köpük önleyici, büzülme önleyici, hava sürükleyici) kullanımına gidilmiştir. YFC yerine %20 oranında silis dumanı ikamesi ile işlenebilirlik ve boyutsal stabilite de önemli gelişmeler sağlanmıştır. Bu nedenle, karışım özelliklerinde çeşitli değişiklikler yapılarak ve çelik lif kullanılarak yüksek performanslı kompozitlerin üretimine yönelik çalışmalar yapılmış ve çimento kullanmadan RPC (Reaktif Pudra Betonu) sınıfına giren kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilmiştir. Üçüncü aşamada, geliştirilen çimentosuz RPC karışımının (ARPC) reolojik ve mekanik özellikleri klasik çimentolu RPC karışımını (KRPC) ile kıyaslanmıştır. Son aşamada, üretilen bu iki RPC karışımının durabilite özellikleri (sülfat etkilerine dayanıklılık, sülfürik asit dayanıklılığı, alkali silika reaksiyonu genleşmesi, çiçeklenme, su emme, donatı korozyonu, karbonatlaşma direnci, darbe etkilerine dayanıklılık, aşınma etkilerine dayanıklılık, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, donma-çözülme dayanıklılığı vb.) detaylı bir şekilde incelenmiş ve karışımların olumlu ve olumsuz özellikleri, içyapı incelemeleri ile desteklenerek sunulmuştur.



## **BÖLÜM İKİ**

### **ALKALİLERLE AKTİVASYON SİSTEMLERİ**

Portland çimentosu üretimi, yüksek CaO içeriğinin sentezlenmesi için büyük miktarda yakıt ve enerji tüketimine ihtiyaç duyar ve önemli bir CO<sub>2</sub> kaynağıdır. Ayrıca, üretiminde kullanılan maddeler nedeniyle de doğal yapıya zarar vermektedir. Bu nedenlerden ötürü Portland çimentosuna alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi çevresel açıdan çok önemlidir. Silikat içeren malzemelerin aktive edilmesiyle, bağlayıcı üretimi sağladığı önemli yararlarından dolayı son zamanlarda ilgi çekmektedir. Bu bağlayıcılar, enerji tasarrufu sağlamasının yanı sıra, ekonomik ve çevresel açılardan da önemli yararlar sağlamaktadır. Ayrıca, Portland çimentosuna kıyasla dış etkilere dayanıklılık bakımından genellikle daha üstündür (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008a, 2008b; Roy, 1999; Teoreanu, Volceanov ve Stoleriu, 2005).

#### **2.1 Tarihsel Gelişimi**

Camsı yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonu ile ilgili çalışmalar eski Sovyetler Birliği, İskandinavya ve Doğu Avrupa ülkelerinde uzun bir geçmişe sahiptir. İskandinavya ülkelerindeki “Trief cements” ve “F-cements” ve alkalilerle aktive edilmiş katkılı çimentolar (Pyrament ticari ismiyle satılan) son örneklerdir (Roy, 1999).

Konuyla ilgili araştırmalar Joseph Davidovits’in çalışmalarından sonra önemli bir artış göstermiştir. Davidovits, kaolin, kireçtaşı ve dolomitin sinterlenmiş ürünlerini, alüminosilikat bileşen olarak kullanarak alkalin bağlayıcılar üretmiş ve patent almıştır. Bu bağlayıcılar “geopolimer” olarak adlandırılmış ve “pyrament” ve diğer ticari isimlerle piyasada satışa sunulmuştur. Finlandiya’da Forss’un “F-cement” ve Ukrayna’da Krivenko’nun “geocements” bağlayıcıları bu kategoriye girer. Özellikle “geocements” adlı bağlayıcının hidrasyon ürünleri doğal minerallere oldukça benzerdir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b; Roy, 1999).

Alkalilerle aktive edilmiş (AA) bağlayıcıların geçmişten günümüze gelişimindeki bazı önemli adımlar Tablo 2.1’de kronolojik olarak özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Alkali aktive ve alkalin bağlayıcıların tarihsel gelişimi (Roy, 1999)

Yazarlar	Yıl	Önem
Feret	1939	Çimentoda cüruf kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkalin çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Bileşen olarak doğal maddelerin kullanımı nedeniyle “alkalin çimentolar” adının ilk kullanımı
Davidovits	1979	“Geopolimer” terimi-daha fazla polimerizasyonu vurgular
Malinowski	1979	Antik kemerli su yollarının karakterizasyonu
Fors	1983	F-çimentosu (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemelerinin karakterizasyonu
Davidovits ve Sawyer	1985	“Pyrament” patent
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik melit cüruflarının aktivasyonu
Malek ve diğer.	1986	Cüruf çimentoları-düşük seviyede radyoaktif atık oluşturur
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların kıyaslanması
Deja ve Malolepsy	1989	klorürlere direnç görülmüştür
Kaushal ve diğer.	1989	Zeolit oluşumunu içeren alkalin karışımlarından adiabatik kür edilmiş nükleer atık oluşumları
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar ve diğer.	1989	$C_{12}A_7$ -cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkalilerle aktive edilmiş cüruf
Wu ve diğer.	1990	Cüruf çimentolarının aktivasyonu
Roy ve diğer.	1991	Hızlı priz alan alkali-aktive bağlayıcılar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali-aktive bağlayıcılar: genel bakış
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonları
Krivenko	1994	Alkalin bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Cüruf ve alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapısı

Son 10 yılda ise bunlara ek olarak önemli sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen sonuçlar ilgili bölümlerde verilmiştir.

## 2.2 Tipleri ve Kullanım Alanları

Teorik olarak silika ve alümina içeren her malzeme alkalilerle aktive edilebilir. Günümüze kadar yapılan araştırmalarda kaolinitik killer, metakaolin, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, uçucu kül - cüruf karışımları, metakaolin - uçucu kül karışımları,

metakaolin - cüruf karışımları, cüruf - kırmızı çamur karışımları, uçucu kül ile kaolin ve bir tür zeolit minerali olan stilbite gibi kalsine olmamış maddelerin karışımları kullanılmıştır. AA bağlayıcıların mekanik dayanımı, alüminosilikat malzemelerin yapısına bağlıdır. Doğal malzemeler daha düşük dayanımlı ürünlerin oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Daha yüksek mekanik dayanımlar kalsine malzemelerin (UK, YFC ve metakaolin gibi) kullanımı ile elde edilebilmektedir. Puzolanik aktivite de olduğu gibi, alkali aktivasyon reaktivitesi amorf alüminyum ve silis içeriğine bağlıdır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Palomo, Grutzeck ve Blanco (1999) kullanılan ana malzemeye göre alkali aktivasyonu için iki model ortaya koymuştur. Bunlardan ilki, yumuşak bir alkalın çözeltisi ve YFC'nin (Si +Ca) aktivasyonu ile ana reaksiyon ürünü olarak C-S-H oluşumudur. Alkali aktivasyonunda (Si+Al) ikinci modele örnek, orta ile yüksek alkalın çözeltilerde metakaolinin alkali aktivasyonudur. Son ürün, polimerik bir model ve yüksek mekanik özelliklerle karakterize edilmektedir.

Krivenko (1997) bağlayıcı sistemleri, Me simgesi Na, K veya Li olmak üzere,  $Me_2O$ - $Me_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  ve  $Me_2O$ - $MeO$ - $Me_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  olarak iki ana kategoriye ayırmıştır. Bu iki bağlayıcı sistemin de kompozisyon bölgeleri örtüşmektedir. Birinci sistemin potansiyel son ürünü alkalın zeolitik tip mineraller iken, ikinci sistemdeki alkali-alkalin toprak zeolitleri, kalsiyum hidrosilikatlar ve karbonatların karışımıdır. Ayrıca, her ikisi de değişen miktarlarda demir ve/veya magnezyum içerebilir. Diğer alkalın çimento bileşenleriyle karıştırılması isteniliyorsa, alçı taşı içermeyen Portland çimentosu klinkerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Roy, 1999).

Krivenko (1997) AA bağlayıcıları (1) geocements, (2) cüruf-alkalin bağlayıcılar, (3) uçucu kül alkalın, (4) alkalın-Portland çimentoları, (5) alkalın alüminat çimentoları olarak 5 kategoriye ayırmıştır. Özellikle 1970'li yıllardan itibaren çeşitli kullanım alanları bulan AA bağlayıcıların yapısal ve yapısal olmayan kullanım alanlarını Tablo 2.2'deki gibi özetlemiştir.

Tablo 2.2 Uygulama alanları (Krivenko, 1997)

	<b>Yapısal</b>	<b>Yapısal olmayan</b>
<b>Yollar</b>	Yerinde dökme ve prefabrik ağır aşınma etkisindeki döşemeler	Atık stabilizasyonu
<b>Tarım endüstrisi</b>	Yerinde dökme ve prefabrik beton; depo	
<b>Endüstriyel</b>	Aside dayanıklı yapı garajları, döşemeler, temeller	Makine gövdeleri
<b>Konut</b>	Prefabrik ve yerinde bina inşaatları, döşemeler, temeller	
<b>Madencilik</b>	Petrol kuyuları groutları, su yalıtımı, su penetrasyonunu önleme	
<b>Hidrolik</b>	Sulama sistemleri, dalgakıranlar	Kaplamalar

Bu malzemelerin en yeni kullanım alanı ise, nükleer atık yönetimi ve zehirli metallere stabilizasyonu da dahil olmak üzere atık yönetimidir. Alkali alüminosilikat reaksiyonları, atıkları ortadan kaldırmada önemli bir role sahiptir. Bariyer olarak veya kapsüllemeye kullanıldığında hem matrisin geçirimsizliğini azaltır, hem de fazların yapısında oluşan belli iyonları sabitleştirir. Zararlı radyoaktif atıklar bentonit, kaolinit, halloysit ve dickite gibi killerle reaksiyona girerek, dayanıklı monolitik katılar oluşturabilir. Genellikle radyoaktif veya zararlı bir atığın katılaştırılmasında, atığın kendisi oldukça alkalidir ve aktivatör olarak iş görür. Alkali atık olmadığı durumda, sodyum veya potasyum tuzları alkali metallere hidroksitlerini oluşturmak için alkaline toprak hidroksitlerle (örneğin kireç) karıştırılabilirler (Roy, 1999).

### 2.3 Kompozisyon ve Hidratasyon Ürünlerinin Karakterizasyonu

Yüksek dayanım ve durabilite için Davidovits zeolit kimyasına dayanarak aşağıda verilen molar oranların kullanılmasını tavsiye etmiştir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

- Alkaline aktivatör için:  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=1,85$
- Metakaolin için:  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (3,5-4,5),  
 $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  (0,2-0,48),  
 $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,8-1,6)
- Aktivatör ve metakaolin arasında:  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (10-25).

Bununla birlikte bazı yazarlar ana madde ile ilgili parametrelerin, silika ve alüminanın tamamı reaktif olmadığı için, UK ve YFC gibi diğer bağlayıcı maddelere uygulanamayacağını savunmaktadırlar. Davidovits'in, kaolini 6 saat 750 °C sıcaklıkta kalsine ederek Kandoxi (Kaolin, Nacrite, Dickite, Okside) adını verdiği yüksek saflıkta bir malzemeyi kullandığını belirtmek gerekir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Barbosa, MacKenzie ve Thaumaturgo (2000), NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş 7 metakaolin hamurunda Davidovits tarafından önerilen molar oranları incelemiştir. Optimum kompozisyonun  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0,25$ ,  $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=10$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,3$  oranlarında olduğu görülmüştür. Xu ve Deventer (2000), orijinal mineraldeki CaO ve  $\text{K}_2\text{O}$  içeriğinin ve Si/Al oranının mekanik dayanımlarla bir korelasyon sunduğunu belirtmiştir. Fletcher, Mackenzie, Nicholson ve Shimada (2005) NaOH ile aktive ettiği metakaolinde, maksimum mekanik dayanımları molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı 16 olduğunda elde etmiştir.

Bağlayıcı düzenlemede, Davidovits sertleşmiş malzemenin ortalama molar oranlarının aşağıdaki gibi olmasını önermiştir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

$$\text{Si:Al} = 2,854 (2,047-5,57)$$

$$\text{K:Al} = 0,556 (0,306-0,756)$$

$$\text{Si:K} = 6,13 (3,096-9,681)$$

$$\text{Ca:Al} = 0,286 (0,107-0,401)$$

$$\text{Si:Ca} = 15,02 (4,882-41,267)$$

Duxon, Provis, Grant, Mallicoat, Kriven ve Deventer (2005), NaOH ve cam suyu ile metakaolinin aktivasyonu sonucunda maksimum dayanım değerini molar Si/Al oranı 1,9 olduğunda elde etmiştir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Wang ve Scrivener (1995), 14 gün 80 °C sıcaklıkta veya 15 ay oda sıcaklığında kür edilmiş NaOH ve cam suyu ile aktive edilmiş çürüfun C-S-H (I), hidrotalsit

( $Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ ) ve  $C_4AH_{13}$  içerdiğini göstermiştir. Zeolitik veya mikalı minerallere rastlanılmamıştır. Richardson, Brough, Groves ve Dobson (1994) 8 yıl oda sıcaklığında kür edilmiş, alkali (K) ile aktive edilmiş YFC hamurlarını karakterize etmiştir. Alüminyumun silisin yerini aldığı, C-S-H'ın PC'dekine kıyasla daha kristalin olduğu görülmüştür. C-S-H çok yakın ölçekte Mg/Al bakımından zengin fazlarla (muhtemelen talsit) birbirine karışmıştır. Malek ve Roy (1997) 14 gün 38 °C sıcaklıkta, K ile aktive edilmiş metakaolinde bazı zeolitik yapılar tespit etmiştir (Roy, 1999).

Fernandez-Jiminez ve Palomo (2003), alkalilerle aktive edilen uçucu küllerin reaktivitesi üzerinde yaptıkları çalışmada, en önemli reaktivite parametrelerinin, reaktif silika içeriği, amorf faz miktarı, tane dağılımı ve kalsiyum içeriği olduğunu bulmuştur. Ana hidrasyon ürünleri içerisinde bulunmamasından ötürü demir ve kalsiyumun mekanik özellikleri etkilemediğini iddia etmişlerdir. Bu iddia, kalsiyumun varlığının daha yüksek mekanik özelliklere sahip olduğunu savunan araştırmalara terstir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

YFC esaslı AA hamurlarının mikroyapısının gelişimi büyük ölçüde, YFC'nin anyonları ile alkali aktivatördeki katyonların birleşiminden etkilenmektedir. YFC'deki silikat anyonları ile alkalın aktivatördeki katyonlar arasındaki iyon değişiminin oluşturduğu kimyasal reaksiyon, silika jeli oluşturur. Bu silika jeli, YFC'deki kalsiyum iyonlarıyla daha ileri reaksiyon sunucunda, silika bakımından zengin C-S-H jeline dönüşebilir. Bazı araştırmacılar,  $Na_2O-CaO-SiO_2-H_2O$  (N-C-S-H) varlığı ile ilgili bir kanıt olmasa da, AA-YFC'deki  $Na^+$  iyonlarının suda çok düşük çözünürlüğünden ötürü, katı bir N-C-S-H çözeltisinin oluşumunu kabul etmektedir. UK esaslı AA hamurların sertleşme mekanizması ise, genellikle alümino-silikat malzemelerin üç boyutlu geopolimerizasyonu ile karakterize edilmektedir. Xu ve Deventer (2000), geopolimerizasyon mekanizmasını iyon çifti teorisini kullanarak açıklamaktadır. Geopolimerizasyon, yüksek alkalın ortamında çeşitli alümino silikat oksitler ile silikatlar arasındaki kimyasal reaksiyonları içermektedir. Bu durum, Si-Al elementlerinin geopolimerizasyonun kaynağı olduğunu gösterir. Davidovits (1994), polimerizasyon prosesinin UK'daki silika ve alüminyum iyonlarını çözmek için

oldukça yüksek alkalın çözeltileri gerektirdiğini belirtmiştir. Bu nedenle, alkalın çözeltilerdeki katyon miktarı, silisyumun çözünmesinin mertebesi, UK'nın molar Si/Al oranı geopolimerizasyonu oluşturmak için önemli bir faktördür (Yang, Song, Ashour ve Lee, 2007).

YFC esaslı AA hamurlarında C-S-H jelinin oluşumu ve UK esaslı AA hamurlarında polimerizasyonun oluşumu için aktivasyon mekanizması, genellikle toplam bağlayıcıdaki molar Si/Al oranı, kaynak malzeme ve alkalın aktivatörün düzenlenmesi ve alkalın aktivatör konsantrasyonundan etkilenmektedir. Ayrıca, kaynak malzemedeki  $Ca^{+2}$  iyonunun miktarı, C-S-H jelinin oluşumu üzerinde etkilidir. Bu nedenle, AA bağlayıcıların mekanik dayanımı, alkali aktivatördeki  $SiO_2/Na_2O$  oranına, kaynak malzemedeki  $SiO_2/Al_2O_3$  oranına ve  $Ca^{+2}$  içeriğine bağlıdır. YFC ve UK genellikle silikon ve alüminyum açısından zengindir. Bu nedenle, aktivasyon mekanizmasını etkileyen kaynak malzemedeki ana bileşenler ve aktivatör konsantrasyonunu birleştiren bir alkali kalite katsayısı ( $Q_A$ ), sodyum silikat tozunun kullanıldığı AA bağlayıcısı için aşağıdaki gibi kurulmuştur. Formülde B, toplam bağlayıcı miktarı olup kaynak malzeme (UK ve YFC) ve alkali aktivatörü (sodyum silikat) kapsamaktadır (Yang, Song, Ashour ve Lee, 2007).

$$Q_A = \left( \frac{Na_2O}{(SiO_2)^2} \cdot Al_2O_3 \cdot CaO \right) / B \quad (\text{ağırlıkça}) \quad (2.1)$$

AA bağlayıcılarda,  $Na_2O$ /kaynak malzeme miktarı önemli bir parametre olsa da, kaynak malzemedeki molar Si/Al oranı ve  $Ca^{+2}$  iyonu miktarının AA bağlayıcıların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini yansıtmaz. Bu nedenle, önerilen alkali kalite katsayısının AA harç veya betonlarının özelliklerini değerlendirmede daha etkili bir indeks olacağı belirtilmiştir (Yang, Song, Ashour ve Lee, 2007).

Yang, Song, Ashour ve Lee (2007), toz sodyum silikat ( $M_s=0,9$ ) ile UK ve YFC bağlayıcılı harç karışımları hazırlamıştır.  $M_s$  oranı çözeltilerin  $SiO_2/Na_2O$  oranını ifade etmektedir. Başlangıç akışkanlığı,  $Q_A$  ile ters orantılı olup,  $Na_2O$ /bağlayıcı oranı arttıkça azalmıştır. Sabit bir  $Na_2O$ /bağlayıcı oranında YFC harçlarının başlangıç

akışkanlığı UK harçlarından daha düşük, akış kaybı ise daha yüksek bulunmuştur. Akış kaybı  $Q_A$  değerinin artmasıyla artmıştır. Bir başka deyiş ile, artan  $Na_2O$ /bağlayıcı oranı ve  $CaO$  içeriği akış kaybını önemli ölçüde arttırmıştır. Bu nedenle,  $Q_A$  değerinin 0,0325 değerinin altında kalması tavsiye edilmiştir. AA-YFC bağlayıcısının dayanımı AA-UK'ya kıyasla çok daha yüksek bulunmuştur.  $Na_2O$ /bağlayıcı oranı 0,063 değerinin altında olduğunda, AA-UK harçlarından önemli bir dayanım elde edilememiştir. AA-YFC hamurlarında PÇ hamurlarındaki gibi C-S-H jeli oluşurken, AA-UK hamurlarında amorf mikroyapılı geopolimerizasyon oluşmaktadır. Wang, Pu, Scrivener ve Pratt (1995) AA-YFC harçlarının PÇ harçlarına kıyasla daha fazla jel boşluğu ve daha az kapiler boşluk içerdiğini, fakat C-S-H jeli oluşumlarının her iki harç için benzer olduğunu bildirmiştir. Diğer yandan, AA-UK harçları, içerdiği mikro çatlaklar nedeniyle gözenekli yapıda olup, bir reaksiyon ürünü kabuğu ile sarılmış amorf mikro küreciklerden oluşmuştur. Bu kusurlar UK esaslı bağlayıcının düşük basınç dayanımının ana nedenlerinden biridir. Xu ve Deventer (2000), stabil geopolimerizasyon prosesinin hidrotermal reaksiyonlarını hızlandırmak için yüksek sıcaklıkların gerekli olduğunu ileri sürmüştür. Bununla birlikte, AA-YFC harçlarının erken dönemdeki basınç dayanımı, PÇ ve AA-UK harçlarından daha yüksek bulunmuştur. AA-YFC ve PÇ harçlarının uzun dönemde dayanım kazanma hızı benzerken, yüksek  $Na_2O$ /bağlayıcı oranlarında (0,088'in üzerinde) AA-UK harçlarının dayanım kazanma hızı çok yüksektir. Sonuç olarak, AA-UK harçlarının uzun dönemli dayanım gelişimi ve AA-YFC'nin erken dayanım gelişimi  $Na_2O$ /bağlayıcı oranlarının artması ile artmıştır. AA harçlarının büzülmesi 14. güne kadar PÇ harçlarından daha yüksek iken, ilerleyen zamanlarda PÇ harçlarından daha düşüktür. Büzülme deformasyonlarının bağlayıcı türünden ve  $Na_2O$ /bağlayıcı oranından bağımsız olduğu görülmüştür. Wang, Scrivener ve Pratt (1994) cam suyu ile aktive edilmiş YFC betonlarında hidrasyon esnasında silikaca zengin jel oluşumundan dolayı PÇ betonlarına kıyasla daha yüksek büzülme deformasyonları tespit etmiştir. Hardjito, Wallah, Sumajouw ve Rangan (2004) AA-UK betonlarının kuruma büzülmesini PÇ betonlarından daha düşük bulmuştur.



## 2.4 Alkalin Aktivatörler

En fazla kullanılan alkalin aktivatörler, sodyum veya potasyum hidroksit (NaOH, KOH) ile sodyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{Na}_2\text{O}$ ) veya potasyum cam suyu ( $n\text{SiO}_2\text{K}_2\text{O}$ ) karışımıdır. En uygun aktivatör, hidroksitler ve çözünebilen silika ile üretilmektedir. Sodyum hidroksit konsantrasyonunun ve cam suyu/hidroksit oranının etkisi tam olarak anlaşılmamıştır. Çünkü farklı ana malzemeler kullanıldığında, optimum alkali konsantrasyonu ve optimum silika modülü sabit kalmamaktadır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

En etkili aktivatörler R ifadesi, Na, K veya Li gibi alkali metal iyonlarını göstermek üzere, alkali hidroksit (ROH), zayıf asitlerin silis içermeyen tuzları ( $\text{R}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{R}_2\text{S}$ , RF) veya  $\text{R}_2\text{O} \cdot (n)\text{SiO}_2$  tip silisli tuzlardır. Wang, Scrivener ve Pratt (1994) optimum  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının cüraf kütlelerinin %3'ü ile %5,55'i arasında değiştiğini bildirmiştir. Silis modülü 1-1,5 olan bir alkalin aktivatör kullanımı ile daha yüksek mekanik dayanımlar elde edileceğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, toz cam suyu kullanımının ise daha düşük performansla sonuçlandığı bildirilmiştir. Hardjito ve diğer. (2004) düşük kalsiyumlu UK için, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltilerinin kombinasyonunun iyi bir aktivatör olduğunu, daha yüksek sodyum hidroksit konsantrasyonları ve kür sıcaklığındaki artışla daha yüksek dayanım elde edilebileceği belirtilmiştir.

Cam suyu içermeyen aktivatörler kullanıldığında daha düşük mekanik performanslar elde edilmiştir. Pinto (2004), metakaolinin aktivasyonunda bir alkalin aktivatörün cam suyuyla kullanımı halinde, basınç dayanımının 30 MPa'dan 60 MPa'a, eğilme dayanımının ise 5 MPa'dan 7 MPa'a yükseldiği bildirilmiştir. Fernandez-Jimenez ve Palomo (2003), sadece NaOH yerine NaOH ve cam suyunun birlikte kullanımı durumunda, 1 günlük basınç dayanımının 40 MPa'dan 90 MPa'a yükseldiğini rapor etmiştir. Criado, Palomo ve Fernandez-Jimenez (2005) çözünebilen silikanın polimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırdığını belirtmiştir. Cam suyunun polimerizasyon reaksiyonunu desteklediği, daha fazla Si içeren bir reaksiyon ürününe ve daha yüksek mekanik dayanımlara neden olduğu belirtilmiştir. Xu ve Deventer (2000), cam suyunun ana malzemenin çözünmesini arttırdığını

bildirmiştir. Doğal alümino silikat minerallerin çoğunun geopolimerizasyonu başlatmak için yeterli Si sağlamadığını ve bu nedenle ilave çözünebilen silika gerektiğini bildirmiştir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Mekanik özellikler genellikle aktivatör konsantrasyonundaki artışla artmaktadır. Bununla birlikte, Palomo, Grutzeck ve Blanco (1999), 12 M konsantrasyonda aktivatör kullanımının 18 M kullanıma göre daha iyi sonuç verdiğini bildirmiştir.

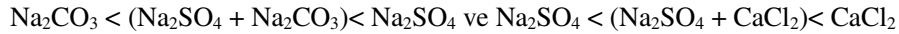
Jaarsveld, Deventer ve Lukey (2003)  $H_2O/SiO_2$  molar oranının alkalilerle aktive edilmiş karışımların mekanik özellikleri üzerinde çok önemli bir parametre olduğunu savunmuştur. Kirschener ve Harmuth (2004), NaOH ve cam suyu ile metakaolinin aktivasyonunu incelemiş ve mekanik dayanımların  $Na_2O/SiO_2$  molar oranının azalmasıyla arttığını bildirmiştir.

Rowles ve O'Connor (2003) metakaolinin alkali aktivasyonunu incelemiş ve Si/Al/Na molar oranı 2,5/1/1,3 olduğunda daha yüksek mekanik dayanım elde edildiğini bildirmiştir. Fernandez-Jimenez, Palomo ve Puertas (1999) optimum alkalın aktivatör konsantrasyonunu cüruf kütlelerinin %3-5'i arasında  $Na_2O$  olarak bildirmiştir. Bu oranların üzerinde  $Na_2O$  kullanımının maliyet açısından yetersiz ve çiçeklenme problemi olan karışımların oluşumuna neden olduğunu bildirmiştir. Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999a) YFC'nin cam suyu esaslı bir aktivatörle ( $M_s=1,25$ ) en yüksek dayanımı verdiğini bildirmiştir. Bununla birlikte, yazarlar optimum dayanımı %8  $Na_2O$  kullanarak elde etmiştir. Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso ve Vazquez (2000) UK/YFC hamurları üzerinde yaptığı çalışmada daha yüksek reaktivitesinden dolayı YFC içeriğindeki artışla basınç dayanımının arttığını bildirmiştir. Xu ve Deventer (2001), stilbite ve kaolin karışımında molar  $SiO_2/Me_2O$  oranının polimerizasyon derecesini etkilediğini göstermiştir. Artan sodyum içeriği, silika ve alüminyumun çözünmesinin artmasına neden olmuştur. Lee ve Deventer (2002), aşırı alkali nedeniyle artan çözünmeyi bildirmiştir. Ancak, bu aynı zamanda kürün ilk zamanlarında bir alümino-silikat jelinin oluşumuna ve mekanik dayanım azalmasına neden olmuştur. Bazı yazarlar, cam suyu/sodyum hidroksit molar oranının basınç dayanımını etkilediğini belirtmiş ve 2,5 molar oranı kullanıldığında

alkalilerle aktive edilmiş UK için anlamlı dayanım artışları ortaya çıkmıştır. Krizan ve Zivanovic (2002) cam suyu ve metasilikat ile YFC'nin alkali aktivasyonunu araştırmış ve en yüksek dayanımı  $M_s$  (1,2-1,5) için elde etmiştir. Xie ve Xi (2001), cam suyu ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiş UK esaslı bağlayıcılar kullanmıştır. NaOH miktarı arttığında silika modülünün azalması ile, silikatın aşırı kristalize olması daha yüksek dayanımdan sorumlu tutulmuştur.

Fernandez-Jimenez ve Palomo (2005)  $Na_2O$  içeriği %5 ile %15 arasında değişen çok sayıda aktivatörle UK'nın aktivasyonunu incelemiştir. Molar  $SiO_2/Na_2O$  oranının ve su/bağlayıcı (S/B) oranının mekanik dayanımı etkilediği görülmüştür. Kütlece UK'nın %5,5'i oranında  $Na_2O$  kullanımı çok düşük pH'a neden olmuş ve reaksiyonun gelişimini olumsuz yönde etkilemiştir.  $Na_2O$  oranının artması ile mekanik dayanım artmış ve optimum mekanik performans UK kütlelerinin %14'ü oranında  $Na_2O$  kullanımı ile elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, malzemenin kompozisyonuna bağlı olarak farklı alkali konsantrasyonları kullanılmalıdır. Kalsiyum içermeyen malzemelerde daha yüksek alkali konsantrasyonları kullanılabilir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Teoreanu, Volceanov ve Stoleriu (2005), 3 tip YFC ve 2 tip UK (belli oranlarda YFC yerine) kullanarak bağlayıcı madde üretmiştir. Aktivatör olarak, bağlayıcının %2-6'sı sönmemiş kireç ile birlikte, %2-7 kalsiyum tuzu ( $CaCl_2$ ) veya sodyum tuzu ( $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $Na_2Al_2O_4$ ) kullanılmıştır. Cürufun yapısının ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  ana bileşenleri) oldukça etkili olduğu görülmüştür. Cürufun bu özel rolü, faz kompozisyonu,  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  sistemi içindeki yeri ve termal geçmişi ile ilgilidir. Baziklik katsayısı yüksek, mellilite- $C_2S-C_3S_2$  alt sistemi içinde YFC daha iyi aktivasyon göstermiştir. Aktivatörlerin aktivasyon etkisi,



şeklinde sıralanabilir. Cüruf özellikleri ve aktivatör tipinin yanı sıra, UK ve kireç miktarı da aktivasyonu etkileyen parametreler arasındadır. Daha iyi aktivasyon gösteren cüruf ile hazırlanan hamurun pH değeri daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca,

performans kaybı olmadan YFC yerine %40'a kadar UK ikamesi yapılabileceği görülmüştür (Teoreanu, Volceanov ve Stoleriu, 2005).

## 2.5 Değişik Katkıların Kullanımı

Davidovits araştırmalarında kalsiyum içermeyen alümino silikat malzemeler kullanmıştır. Pyrament cement'in kompozisyonun %80'i Portland çimentosu (iddiaya göre, düşük maliyetinden ötürü), %20'si ise potasyum karbonatla aktive edilmiş geciktirici olarak sitrik asidin kullanıldığı geopolimerik malzemelerdir. Ayrıca, patentli geopolimerik bağlayıcılar olan PZ-Geopoly ve Geopolycem'de kompozisyonunun %11'i CaO içermekte olup, alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılarda kalsiyumun önemini doğrulamaktadır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

Douglas, Bilodeau, Brandstetr ve Malhotra (1991) alkalilerle aktive edilmiş karışımlarda YFC'nin SD ve UK ile ikamesinin dayanımı arttırdığını belirtmiştir. Bununla birlikte, dayanım yüksek ikame oranlarında önemli derecede azalmıştır. Cheng, Tagnit-Hamou ve Sarkar (1992) alkalilerle aktive edilmiş cüruf karışımlarında %1,9-%3,4 oranında Ca(OH)<sub>2</sub> kullanıldığında, mekanik dayanımda önemli bir artış olduğunu bildirmiştir. Alonso ve Palomo (2001a), alkalilerle aktive edilmiş metakaolin/kalsiyum hidroksit karışımlarında, metakaolin miktarında kalsiyum hidroksitin üzerinde bir artışın, artan çözülmüş alümino silikat türleri nedeniyle, alkalın alümino silikat bileşenlerin oluşumunda artışa neden olduğunu bildirmiştir. Aynı zamanda, sıcaklık artışının iyon hareketini azaltarak reaksiyonu hızlandırdığı belirtilmiştir. Diğer bir araştırmada Alonso ve Palomo (2001b), sodyum hidroksit konsantrasyonunun reaksiyon ürünlerinin yapısı üzerindeki etkisini incelemiş ve reaksiyon ürünlerinin yapısı üzerinde kritik rol oynayan parametreleri aşağıdaki şekilde belirtmiştir:

- Alkalın aktivatör konsantrasyonu 10 M veya daha yüksek olduğunda, hidroksitlerin (OH<sup>-</sup>) varlığından ötürü Ca(OH)<sub>2</sub> in çözünmesi çok zordur. Diğer bir deyişle, C-S-H jeli oluşumu için yeteri kadar Ca(OH)<sub>2</sub> yoktur. C-S-H yerine sodyum esaslı alümino silikat oluşur, OH<sup>-</sup> iyonlarını yapısına

çekerek miktarını azaltır. Böylelikle, ikincil reaksiyon ürünü olarak C-S-H jeli oluşumuna izin verir.

- Alkalın aktivatör konsantrasyonu 5 M'dan daha düşük olduğunda, hidroksit (OH)<sup>-</sup> miktarı çok düşüktür. Bu nedenle, kalsiyum hidroksitin çözünmesi meydana gelir. Bir başka deyişle, C-S-H jeli oluşturmak için yeterli Ca<sup>+2</sup> vardır. Bunun yanında, düşük alkalın konsantrasyonlu ortam metakaolinin çözünmesini önler. Bu nedenle, alkalın alümino silikatların oluşumu için yeteri kadar çözünmüş alüminyum yoktur. Diğer bir deyişle, silika C-S-H oluşturmak için serbest kalacaktır.

Escalante-Garcia, Gorokhovsky, Mendonza ve Fuentes (2003) YFC yerine %10 geotermal atık silika ikame etmiştir. Aktivatör sadece NaOH olduğunda, ikame daima dayanım artışı sağlarken, cam suyu içeren aktivatör kullanıldığında, dayanım artışı sadece ilk 7 gün olmuştur. İlerleyen zamanlarda ise, aşırı silika nedeniyle H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> oluşumu daha düşük dayanımlara neden olmuştur.

Sebebi hala açık olmasa da, kalsiyum hidroksit kullanımı mekanik özelliklerde artış sağlamaktadır. Pinto, alkalilerle aktive edilmiş metakaolinin dayanımının 12 M NaOH aktivatörü kullanıldığında, %20'ye kadar Ca(OH)<sub>2</sub> kullanımı ile arttığını, 15 M NaOH aktivatörü kullanıldığında etkilenmediğini bildirmiştir (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

## BÖLÜM ÜÇ

### ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI BAĞLAYICILARIN ÖZELLİKLERİ

YFC'nin alkali aktivasyonuna dayanan bağlayıcıların endüstriyel üretimi 1960-1964 yılları arasında Ukrayna'da başlamıştır. Bu tip bağlayıcıların kullanımı, üretiminde endüstriyel atıkların kullanılması nedeniyle, daha önce de belirtildiği gibi, Portland çimentolarına kıyasla önemli ekonomik ve çevresel avantajlar sunarlar. Portland çimentosu üretiminde kullanılan hammaddelerin eldesi doğal yapıya önemli zararlar vermektedir. Ayrıca, bu hammaddelerin yüksek CaO içeriğinin sentezlenmesi sırasında önemli miktarda enerji harcanmakta ve doğaya yüksek miktarda CO<sub>2</sub> gazı salıverilmektedir.

Bu bağlayıcılar, PÇ'ye kıyasla önemli teknik avantajlara da sahiptir. Bunlar; daha erken ve daha yüksek mekanik özellikler, daha düşük hidrasyon ısı, düşük porozite, düşük permeabilite, hidratların düşük çözünürlüğü, kimyasal etkilere ve karbonatlaşmaya daha yüksek dayanıklılık, donma-çözülme etkilerine daha yüksek dayanıklılık, donatılı elemanlarda düşük donatı korozyonu hızı, yüksek klorür difüzyon hızlarından kaynaklanan etkilere dayanıklılık, daha iyi agrega-matris ara yüzeyi oluşumu olarak sayılabilir. Ayrıca, düşük üretim maliyeti, enerjinin verimli kullanımı ve çevre dostu olması da önemli özelliklerindedir. Bununla birlikte, hızlı priz, yüksek büzülme, ilerleyen dönemlerde mikro çatlak oluşumu, çiçeklenme gibi dezavantajları vardır. Ayrıca, bazı yazarlar bu bağlayıcıların alkali-agrega reaksiyonu nedeniyle genişleme oluşturabilmesi olasılığının daha fazla olduğunu ileri sürmektedirler (Bakharev, Sanjayan, Cheng, 1999b; Fernandez-Jimenez, Palomo ve Puertas, 1999; Zivica, 2006).

AA-YFC bağlayıcıları doğu Avrupa, İskandinavya ve Çin'de kullanılmaktadır. Kullanılan aktivatörden bağımsız olarak, ana hidrasyon ürünü düşük C/S oranlı ve değişen derecelerde kristaliniteye sahip C-S-H'tır. Ayrıca, NaOH veya cam suyu ile aktivatörün tipine ve konsantrasyonuna bağlıdır. En iyi dayanım gelişimi sodyum silikat esaslı aktivatör kullanımıyla elde edilmiştir (Chang, 2003).

YFC su ile çok yavaş reaksiyona girer. Bununla birlikte, alkali aktivatörden gelen hidroksil iyonlarının ( $\text{OH}^-$ ) YFC'deki yapının çözünmesini sağlayarak hidrasyon hızını arttırdığı bilinmektedir. Hidrolitik iyonlar  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  gibi güçlü alkalilerden ortaya çıkabilmektedir. Alkaliler çeşitli kimyasal reaksiyonlar (örneğin, kalsiyum sülfat ve sodyum hidroksit üretiminde sodyum sülfat ile kalsiyum hidroksitin reaksiyonu) yoluyla da oluşabilmektedir (Zivica, 2006).

Alkalin bağlayıcılarla ilgili çalışmaların çoğu YFC'nin alkalilerle aktivasyonu ile ilgilidir. Bir alkali kaynağının ilavesi ile bu cüruflar  $\text{Me}_2\text{O}-\text{MeO}-\text{Me}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  sisteminin alanına girer. "Alkali ile aktive edilmiş" terimi  $\text{R}^+$  (alkali) iyonlarının bu malzemelerde ilk aşamada katalitik rol oynadığına ve sonraki aşamada yapıyla birleşerek zeolit benzeri fazlar oluşturduğunu savunan araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. AA-YFC bağlayıcılarının genel reaksiyon ürünleri, C-S-H,  $(\text{C},\text{M})_4\text{AH}_{13}$  veya hidrotalsit ve az miktarda  $\text{C}_2\text{ASH}_8$  (strätlingite) tür (Roy, 1999).

Cürufun aktivasyonunda, kostik alkaliler (Na, K veya Li hidroksit), zayıf asitlerin silikat içermeyen tuzları ( $\text{R}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{R}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{R}_2\text{S}$ , veya  $\text{RF}$ ;  $\text{R}=\text{Na}$ , K veya Li) ve  $(\text{R}_2\text{O})(\text{n}).\text{SiO}_2$  tipindeki silikat tuzları aktivatör olarak kullanılmaktadır. YFC'nin camsı faz miktarı, kimyasal ve mineralojik kompozisyonu ve kullanılan aktivatörün tipi ve konsantrasyonu gibi çok sayıda faktör aktivasyonu etkilemektedir. Bazik cürufların (fazla miktarda kireç, alüminyum oksit, magnezyum oksit, alkaliler vb. içeren) aktivasyonunda yukarıda verilen 3 tip aktivatörde kullanılabilirken, nötr veya asidik cüruflarda (fazla miktarda silika, fosforlu bileşenler vb.) zayıf asitlerin silikat içermeyen tuzlarının kullanımı tavsiye edilmemektedir (Ramachandran, 1995).

Aktivatör olarak sodyum hidroksit, sodyum karbonat, F-aktivatör ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve linyosülfonat-Finlandiya'da üretilmekte), sodyum silikat, sodyum sülfat, potasyum sülfat, kireç ve bunların kombinasyonu kullanılmaktadır. Daha iyi işlenebilirlik ve düşük su ihtiyacı için, linyosülfonatlar, glukonatlar ve süper akışkanlaştırıcılar gibi katkılar da aktivatörle birlikte ilave edilmektedir. Genellikle kullanılan aktivatörler, sodyum hidroksit, sodyum silikat, sodyum karbonat ve sodyum sülfattır. En etkili ve en yaygın olarak kullanılan aktivatör sodyum silikattır.

Rusya ve Çin’de yayınlanan sonuçlar, basınç dayanımı için en iyi sonuçların cam suyu çözeltisi (sıvı sodyum silikat) ile aktive edilmiş YFC betonlarından elde edildiğini göstermiştir. AA-YFC’nin dayanımına silikat anyonlarının ana katkısı hem alkalın aktivasyonundan hem de silikat jeli oluşumundan kaynaklanmaktadır. Bu jel, kalsiyumla reaksiyona girerek silika açısından zengin C-S-H oluşturur. Cam suyunun en önemli özelliği, ağırlıkça  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranıdır. Ticari olarak üretilen silikatlarda bu oran 1,5-3,2 arasındadır. Aktivatörün etkinliği birçok faktöre bağlı olup; tipi, dozajı, ortam sıcaklığı ve su/YFC oranı en önemli olanlardır. Sıvı cam suyu kullanımı, viskozitesi yüksek harçların üretimine yol açmaktadır. Bu sorun, toz cam suyu kullanılarak giderilebilse de, bu durumda dayanım daha düşük olmaktadır (Zivica, 2006; Pachero-Torgal, Castro-Gomez ve Jalali, 2008c; Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999a).

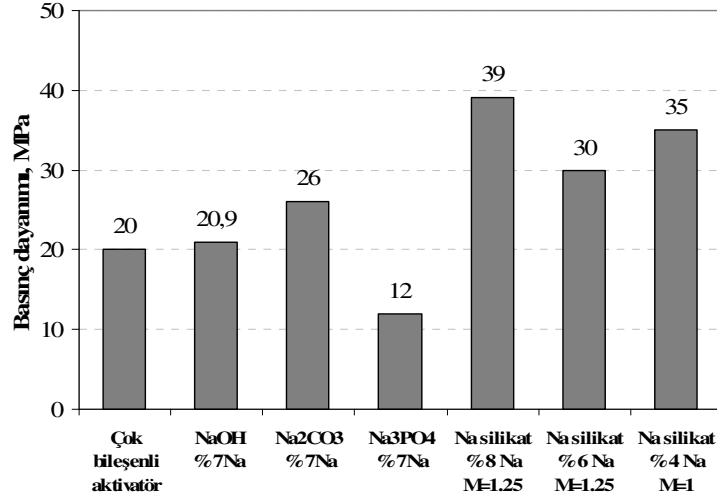
Aktive edilecek malzemenin fiziko-kimyasal yapısı da önemlidir. Amorf fazların varlığı alkalilerle iyi reaktivite göstermesinden dolayı önemli rol oynamaktadır. Sertleşmiş AA-YFC sisteminin oluşan sonuç yapısı, kür prosesince belirlenmektedir (Zivica, 2006).

Fernandez-Jimenez, Palomo ve Puertas (1999), YFC ağırlığının %3 ve %5’i arasında  $\text{Na}_2\text{O}$  kullanımını tavsiye etmiştir. Daha düşük oranlarda aktivasyon prosesi gecikirken, daha yüksek değerler gevreklik ve çiçeklenme problemleri yaratabilmekte ayrıca ekonomik olmamaktadır. Mekanik dayanım üzerinde incelenen değişkenlerin etkisi: aktivatör tipi >>> aktivatör konsantrasyonu > kür sıcaklığı  $\approx$  YFC’nin özgül yüzeyi şeklindedir. Dayanım üzerinde etkili en önemli faktör aktivatörün tipi olup sıralama  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH} >> \text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaOH}$  şeklindedir.

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999a), farklı  $M_s$  ve Na oranları içeren cam suyu çözeltisi, sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum ortofosfat çözeltileri ile çok bileşenli aktivatör (sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve linyosülfonat karışımı) kullanarak yaptığı deneylerde, en etkili aktivatörün sodyum silikat olduğunu bildirmiştir (Şekil 3.1). Sodyum silikat aktivatörlü sistemlerde, yüksek erken dayanım düşük modüllerde ( $M_s=0,75$ ) elde edilirken, 28. günde yüksek dayanım  $M_s$  1 ile 1,25 için elde edilmiştir. Sodyum ortofosfat ve sodyum karbonat ile aktive



edilmiş hamurların işlenebilirlik ve dayanımının düşük olduğu görülmüştür. Sodyum karbonat, sodyum ortofosfat ve çok bileşenli aktivatör sistemi için elde edilen düşük dayanım değerleri, kullanılan cürufun nötr olmasına bağlanmıştır. Aktivasyon için gerekli en düşük Na içeriği ilk 24 saatte yeterli sertleşme sağlanabilmesi bakımından, cüruf ağırlığının %4'ü olarak önerilmiştir.

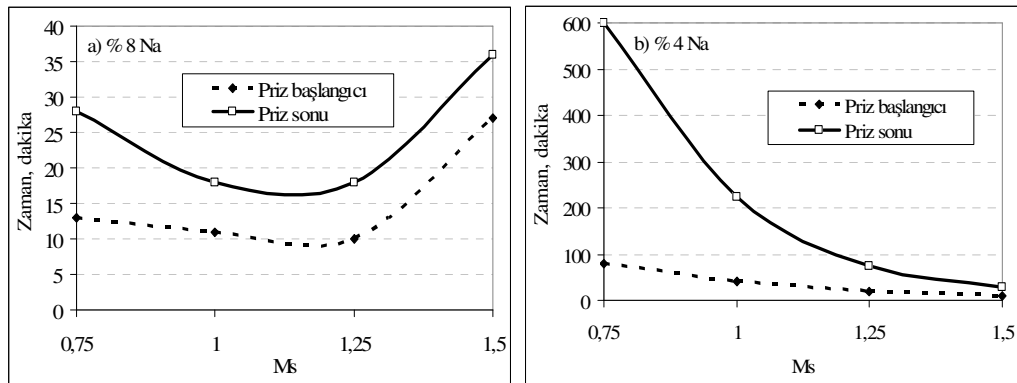


Şekil 3.1 Alkalilerle aktive edilmiş cüruf hamurlarının 28 günlük basınç dayanımı (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999a).

AA-YFC betonları PÇ betonlarından daha fazla büzülmüş, büzülme alkali konsantrasyonun artmasıyla artmıştır. En yüksek büzülme sodyum silikat içeren betonlarda görülmüştür. Sodyum silikat için, büzülme aynı zamanda çözeltinin modülüne de bağlı olup, maksimum büzülme  $M_s=1$  iken elde edilmiştir. Daha yüksek büzülmeden bu modülde oluşan C-S-H'nin özelliklerinin sorumlu olduğu düşünülmektedir. Way ve Shayan (1989), yüksek NaOH konsantrasyonunda 0,17 mol Na'un C-S-H'taki Ca ile yer değiştirdiğini ve normal C-S-H'dan daha az yoğun olduğunu göstermiştir. Hidratasyonun erken dönemlerinde silika jeli N-C-S-H ile karışmış olup, bu olaya katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999a).

Sodyum silikat aktivatörlü hamurların işlenebilirliği  $M_s$ 'in artmasıyla hızla düşmüştür. İçeriğinde %4 Na bulunan NaOH ile aktive edilmiş cüruf normal priz karakteri gösterirken, %7'nin üzerindeki Na içeriklerinde yalancı priz davranışı

gözlenmiştir. Yüzde 7 Na içeren sodyum karbonat ve sodyum fosfat karışımları ani priz göstermiştir. Sodyum silikat ile aktive edilmiş PÇ/YFC karışımı ani prize yakın bir davranış göstermiştir. Yüzde 4 Na içeren  $M_s$  değeri 0,75 ve 1 olan sodyum silikat ile aktive edilmiş hamurlar normal priz yapan çimentolar, %4 Na içeren  $M_s$  değeri 1,25 ve 1,5 olan sodyum silikat ile aktive edilmiş hamurlar ile %8 Na içeren sodyum silikat ile aktive edilmiş hamurlar ise hızlı priz yapan çimentolar sınıfına girmiştir. Yüzde 4 ve %8 Na konsantrasyonunda, priz davranışı modülden farklı şekilde etkilenmiştir (Şekil 3.2). Yüzde 8 Na konsantrasyonunda en iyi işlenebilirlik 0,75 ve 1,5  $M_s$  oranlarında elde edilirken, %4 Na konsantrasyonunda 0,75 değerinde elde edilmiş,  $M_s$  oranının artmasıyla priz süresi kısalmıştır. Na konsantrasyonundaki artışla dayanımdaki artışın çok düşük olması ve Na içeriğinin artmasıyla işlenebilirliğin azalması nedeniyle, %4 Na içeriği tavsiye edilmiştir (Bakharev, Sanjayan, ve Cheng, 1999a).



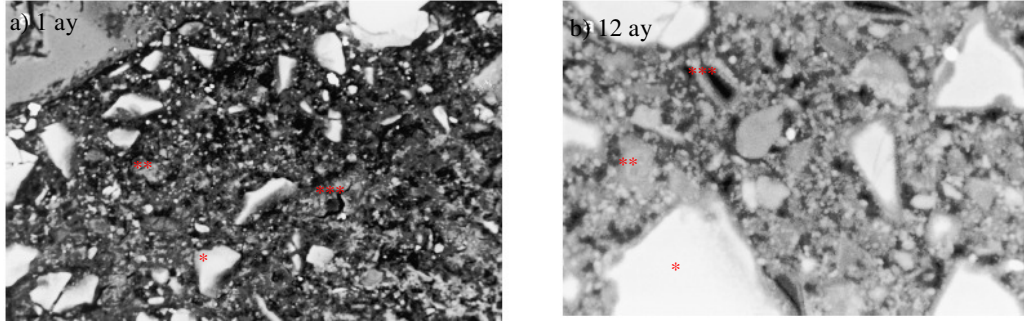
Şekil 3.2 Sodyum silikat ile aktive edilen hamurların priz süreleri (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999a).

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999b), kür sıcaklığının AA-YFC betonlarının mikroyapısı, büzülmesi ve basınç dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Aktivatör olarak sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit  $M_s$  değeri 0,75 ve YFC'nin %4'ü oranında Na içerecek şekilde karıştırılmıştır. AA-YFC betonlarının dayanım gelişiminin yüksek sıcaklıkta kür edildiğinde, erken dönemlerde PÇ betonlarına kıyasla daha hızlı olduğu görülmüştür. Ön bekleme sonrası ısı kürü ile daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta kür edilen AA-YFC betonlarının dayanımı ileriki yaşlarda oda sıcaklığında kür edilenlere kıyasla %35-40 daha düşük

bulunmuştur. PÇ betonlarına benzer olarak ısı kürü uygulanan AA-YFC betonlarında görülen yavaş dayanım gelişimi, mikroyapının homojen olmamasına, hidrasyon ürünlerinin YFC tanelerine yakın bir şekilde yerleşmesine ve oluşan kaba boşluk yapısına bağlanmaktadır. Çoğu hidrasyon ürünü YFC tanelerinin yakınında kalacağından reaksiyon hızı difüzyon hızından çok daha hızlıdır. Yüksek sıcaklıklarda çökelen daha yoğun ürünler iyon difüzyonu için bir bariyer oluşturabilir, bu yüzden homojen olmayan bir mikroyapıya neden olur.

Isıl işlem uygulaması büzülme değerlerini azaltmıştır. Bu durum yüksek kür sıcaklıklarında oluşan C-S-H'nin daha düşük su içeriğine sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Isı kürü öncesinde oda sıcaklığında ön bekleme AA-YFC betonlarının büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999b).

Şekil 3.3'te YFC betonlarının ısı işlem sonrasında 1 ve 12 ay süreyle oda sıcaklığında su içerisinde bekletildikten sonra mikroyapısı görülmektedir. Hidrasyon ürünleri YFC tanelerinin etrafındaki bölgeye (PÇ betonunda çimento taneleri etrafındaki bölgeye) yerleşmiştir. Bu nedenle aradaki boşluklar açık kalmıştır. PÇ'nin mikroyapısı AA-YFC'ye kıyasla daha homojendir. AA-YFC betonları PÇ betonuna kıyasla daha açık bir mikroyapıya sahiptir. YFC taneleri yerinde hidrate olma eğiliminde olup, hidrasyon ürünleri aradaki boşluğa dağılmamıştır. Bu eğilim 12 aya kadar devam etmiş olup, YFC'de PÇ'ye kıyasla daha fazla gelişmiştir. İleriki yaşlarda depolanan hidrasyon ürünleri daha koyu renklidir (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999b).



Şekil 3.3 6 saat 70 °C sıcaklıkta kür edilmiş AA-YFC betonlarının SEM (BSE) fotoğrafları (hidrate olmamış YFC : parlak beyaz faz, C-S-H : açık gri faz, boşluklar : koyu gri) (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 1999b).

Yongde ve Yao (2000), kullanılan alkali aktivatörün, çeşitli toz bağlayıcıların ve kür koşullarının, YFC esaslı bağlayıcı hamurların özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. NaHCO<sub>3</sub> aktivatörü kullanımında dayanım elde edilememiştir. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivatörü kullanımı halinde ise ancak 3. günden sonra dayanım elde edilebilmiş, 7. günden itibaren ise oldukça yüksek dayanımlar (20-34 MPa) elde edilebilmiştir. NaOH aktivatörü ise hem erken, hem de ileriki yaşlarda dayanım açısından iyi sonuçlar vermiştir. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve NaOH aktivatörlerinin birlikte kullanımı, aktivatörlerin yalnız başlarına kullanımına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. YFC'ye ilave olarak çeşitli oranlarda UK, genişletici madde, zeolit, fluorigypsum ve diyatomit kullanılmıştır. Sadece YFC ve alkali kullanıldığı zaman şiddetli çatlama eğilimi vardır. Diyatomit (%10), fluorigypsum (%15) ve UK (%20) çatlama eğilimi açısından oldukça iyi etki yapmıştır. UK, genişletici madde, zeolit, diyatomit vb. maddeler dayanım gelişimi açısından yararlıdır. Ancak, bazı örneklerde şiddetli derecede çatlama eğilimi görülmüş ve bu nedenle eğilme dayanımı azalmıştır. Çatlamanın önlenmesi ve büzülmenin azaltılması bakımından su içerisinde kür yapılması diğer önemli etkidir. Örnekler su içerisinde kür edildiğinde, basınç dayanımında gelişme olmamasına rağmen, eğilme dayanımı havadakine göre çok daha iyidir ve çatlama eğilimi en aza düşmüştür. Su içerisinde 80 °C sıcaklıkta kür ile dayanım önemli derecede artsa da, kür sonrası havada bekleyen numuneler (büzülme nedeniyle) birkaç gün sonra ciddi derecede çatlamıştır. Deney sonuçları örnek yüzeyinde çatlak oluşumunun büzülme 2 mm/m değerini aştığında oluştuğunu göstermiştir. Elli donma-çözülme çevrimi

sonunda, havada bekleyen numunelerde daha düşük oranda serbest su içermesi nedeniyle dayanım kaybı oluşmazken, suda bekleyenlerde %15-18 dayanım kaybı oluşmuştur.

Puertas, Amat, Fernandez-Jimenez ve Vazquez (2003) alkalilerle aktive edilmiş YFC, UK ve %50YFC+%50UK harçlarının, mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde polipropilen lif kullanımının (%1'e kadar) etkisini incelemiştir. YFC,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$  çözeltisi ile, ağırlıkça YFC'nin %4'ü oranında  $\text{Na}_2\text{O}$  ile aktive edilmiş ve oda sıcaklığında kür edilmiştir. UK, 8 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş ve 85 °C sıcaklıkta 24 saat kür edilmiştir. UK(%50)+YFC(%50), 8 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiş ve oda sıcaklığında kür edilmiştir. AA-YFC harçları çimentolu harçtan ve UK içeren diğer aktivatör sistemlerinden daha yüksek dayanım vermiştir. Daha yüksek mekanik dayanım, düşük porozite ve ana reaksiyon ürünlerinin yapısından kaynaklanmaktadır. AA-YFC harçları çok düşük poroziteye (çimentoluya göre %10 daha düşük) sahip olup, zamanla porozitesi azalmaktadır. Ayrıca, YFC'nin alkalik aktivasyonu sonucunda oluşan C-S-H'nin kompozisyonu ve yapısı PÇ'nin hidratasyonu sonucunda oluşandan farklıdır. Yarı kristalin C-S-H, silikat doğrusal zincirinin tetrahedral köprülerinde yüksek oranda Al ve PÇ hamurlarında oluşan C-S-H jelinden daha düşük Ca/Si oranı sunar. Polipropilen lif ilavesi mekanik dayanımlar üzerinde pozitif katkı sağlamamıştır. Bazı durumlarda işlenebilirlikteki azalma nedeniyle dayanımda azalma olmuştur. AA harçların elastisite modülü PÇ harçlarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Polipropilen lif kullanımı PÇ harçlarının darbeye dayanıklılığını AA harçlara kıyasla daha fazla arttırmıştır. Yüksek alkaliniteye sahip boşluk çözeltisinin liflerin yüzeyinde yarattığı değişikliklerin matrisine aderansı kötü etkilediği düşünülmüştür. AA-YFC harçları yüksek dereceden nemli bir ortamda bekletildiğinde erken yaşlarda yüksek büzülme göstermiştir. Yüksek dereceden nemli ortamda (%95) büzülmenin, matris karakteristikleri ve çoğunlukla ana reaksiyon ürününün yapısı ile (temel olarak, yapısında Al içeren C-S-H) ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yüksek nem içeriği, aktivasyon prosesini desteklemiş ve büyük miktarda reaksiyon ürünü oluşturmuştur. Laboratuvar koşullarında büzülme 50. güne kadar sürekli olarak artmıştır. Büzülme büyük oranda boşluk sistemindeki suyun kurumasından kaynaklanmaktadır.

Polipropilen lifler matris ve agregalar arasında bağ oluşturarak boyutsal stabiliteye katkıda bulunmuş ve büzülme azaltmıştır. UK bağlayıcılı aktive harçlar ise, PÇ harçlarına ve AA-YFC harçlarına kıyasla her iki ortam koşulunda da boyutsal olarak yüksek derecede stabilite göstermiştir. Bu, büyük oranda ana reaksiyon ürününün (alüminosilikatlar tarafından oluşturulan 3 boyutlu yapı) stabilitesinden kaynaklanmaktadır.

Andersson ve Gram (1988), alkalilerle aktive edilmiş örneklerin mekanik dayanımının, cürufun Blaine inceliği 530 m<sup>2</sup>/g'dan 670 m<sup>2</sup>/kg'a çıktığında çok fazla artmadığını göstermiştir. Talling ve Brandstetr (1989), optimum dayanım değerini cürufun Blaine inceliği 400 m<sup>2</sup>/kg olduğunda elde etmiştir. Wang, Scrivener ve Pratt (1994) optimum Blaine inceliğinin cürufun tipine bağlı olarak, 400-550 m<sup>2</sup>/kg arasında değiştiğini ifade etmiştir. Brough ve Atkinson (2002), Blaine inceliğinin 332 m<sup>2</sup>/kg değerinden 550 m<sup>2</sup>/kg değerine çıkmasıyla dayanımın 65 MPa'dan 100 MPa'a çıktığını bildirmiştir. Fernandez-Jimenez, Palomo ve Puertas (1999), YFC'nin özgül yüzeyinin mekanik dayanımlara etkisinin sadece erken yaşlarda (3. gün) etkili olduğunu rapor etmiştir. İnceliğin artması reaktiviteyi arttırsa da, artan karıştırma sıvısı ihtiyacı dayanımda azalmaya yol açabilmektedir. NaOH ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivatörlü sistemlerde özgül yüzey artışı ile mekanik dayanım artarken, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+NaOH aktivatörlü sistemde azalmıştır.

### 3.1 Hidratasyon Ürünleri

AA-YFC bağlayıcılarının ana hidratasyon ürünü C-S-H'tır. Diğer hidratasyon ürünleri ise, YFC ve aktivatörün türüne göre değişmektedir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

YFC'nin MgO içeriği genellikle düşüktür ve CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sistemine girmektedir. CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O sisteminin faz diyagramında beş farklı ürün vardır. Bunlar, C-S-H, Ca(OH)<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub>, C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> ve CS<sub>2</sub>H'dır. Aktivatörün varlığında ise, hidratasyon ürünleri YFC'nin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak

değişebilmektedir. YFC, NaOH ile aktive edildiğinde C-S-H'in yanı sıra  $C_4AH_{13}$  ve  $C_2ASH_8$  tespit edilmiştir. YFC'nin MgO içeriği yüksekse,  $C_4AH_{13}$  yerine  $M_4AH_{13}$  oluşmaktadır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Aktivatörün tipi hidrasyon ürünleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. NaOH ve kireç ile aktive edilmiş YFC'nin hidrasyon ürünleri C-S-H,  $C_4AH_{13}$  ve  $C_2ASH_8$  olup, sülfatların varlığında etrenjit oluşmaktadır. Sodyum karbonat, sodyum silikat ve sodyum hidroksit ile aktive edilmiş YFC hamurlarında ana hidrasyon ürünü C-S-H olup, minör hidrasyon ürünleri aktivatörün yapısına bağlı olarak değişmektedir. Sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC'de  $C_4AH_{13}$ , sodyum karbonatla aktive edilmiş YFC'de  $C_3A.CaCO_3.12H_2O$ , NaOH ile aktive edilmiş YFC'de ise  $C_4AH_{13}$  ve  $C_2ASH_8$  tespit edilmiştir. NaOH ve KOH ile aktive edilmiş YFC'nin hidrasyon ürünleri arasında çok küçük farklılıklar mevcuttur. Farklı aktivatörlerin varlığı nedeniyle hidrasyon ürünlerindeki değişim hidrasyon prosesini ve mikroyapı oluşumunu değiştirerek dayanım gelişimini etkilemektedir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

NaOH ile aktive edilmiş YFC bağlayıcılarındaki C-S-H'in kristalinetesi cam suyu ile aktive edilene kıyasla daha yüksektir. NaOH ile aktive edilmiş YFC bağlayıcılarında kristalin bir bileşen olan hidrotalsit de tespit edilmiştir. Atmosfer basıncı altında kür sıcaklığındaki artış ile kullanılan aktivatörün yapısından bağımsız olarak C-S-H'in kristalinetesi artmaktadır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Otoklav kürü durumunda, hidrasyon prosesi ve hidrasyon ürünleri atmosferik basınç altındakinden çok farklıdır. Xonotlit, tobermorit ve sodyum zeolit ( $Na_2H_3$ ) gibi kristalin ürünler oluşabilmektedir. Alkalilerle aktive edilmiş YFC hamurlarının 150 °C'de hidrasyonu sonucunda ana hidrasyon ürününün C-S-H (B) ve xonotlit olduğu tespit edilmiştir. Bir başka araştırmada, cam suyu ile aktive edilmiş YFC bağlayıcılarında 200 °C'ye kadar ana hidrasyon ürünlerinin C-S-H ve tobermorit fazları olduğu görülmüş, 300 °C'de ise tobermorit ve xonotlit kristalleri tespit edilmiştir. Bu aynı zamanda, arzu edilmeyen gözenekli mikroyapı, dayanımın

gerilemesi ve su geçirirmliliğinin artması ile sonuçlanmıştır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

### **3.2 YFC Yerine Diğer Malzemelerin İkamesi ile Oluşturulan Sistemler**

Gerek kullanılan YFC miktarını azaltmak gerekse ürün özelliklerini geliştirmek amacıyla YFC yerine belli oranda, Portland çimentosu (PÇ), kırmızı çamur (KÇ), silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) gibi mineral katkıların kullanımı yoluna gidilmektedir. Aşağıda bu yönde yapılan araştırmalar sunulmuştur.

#### **3.2.1 YFC-PÇ Sistemleri**

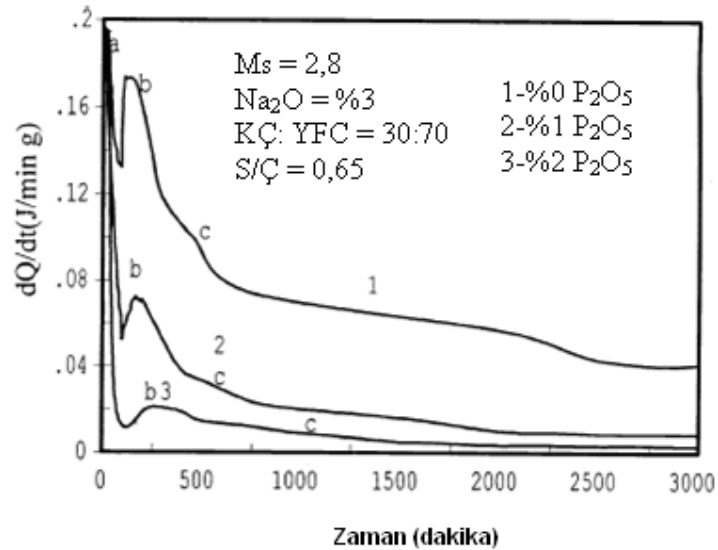
Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999a), %4 Na içeren ve  $M_s$  değeri 0,75 olan sıvı sodyum silikat ile aktive ettiği %30 PÇ/%70 YFC karışımının basınç dayanımının oldukça düşük olduğunu (28 günde sadece 18 MPa) bildirmiştir. Bu durum, alkalın aktivatörün Portland çimentosunun hidrasyonu üzerindeki etkisinden (önemli miktarda kalsiyum hidroksit ve Na içeren C-S-H oluşumu-çimento ve su karışımının hidrasyon ürünlerine kıyasla daha az yoğun ve düşük dayanımlı) kaynaklanıyor olabilir.

#### **3.2.2 YFC-KÇ Sistemleri**

Zhijua, Cheng, Lu ve Nanru (2002), KÇ (%30) ve YFC (%70) karışımını aktive etmiştir. Aktivasyonun toz cam suyunun yanı sıra sodyum alüminat klinkerinin kullanımı ile daha etkili olabileceği görülmüştür. Buhar kürünün hidrasyon hızını önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Amorf C-S-H yapının varlığı tespit edilmiştir. AA YFC-KÇ bağlayıcılarının hidrasyon ürünlerinin çoğunlukla çok düşük Ca/Si oranlı (0,8-1,2), 100 nm gibi çok küçük tane boyutlu ve çok düzensiz şekilli morfolojide C-S-H jeli olduğu görülmüştür. Kristalize kalsiyum hidroksit, etrenjit ve zeolit benzeri fazlar oluşmamıştır. Hidrasyon ürünleri aktivatör tipinden ve kür koşullarından bağımsız olarak benzer bulunmuştur.

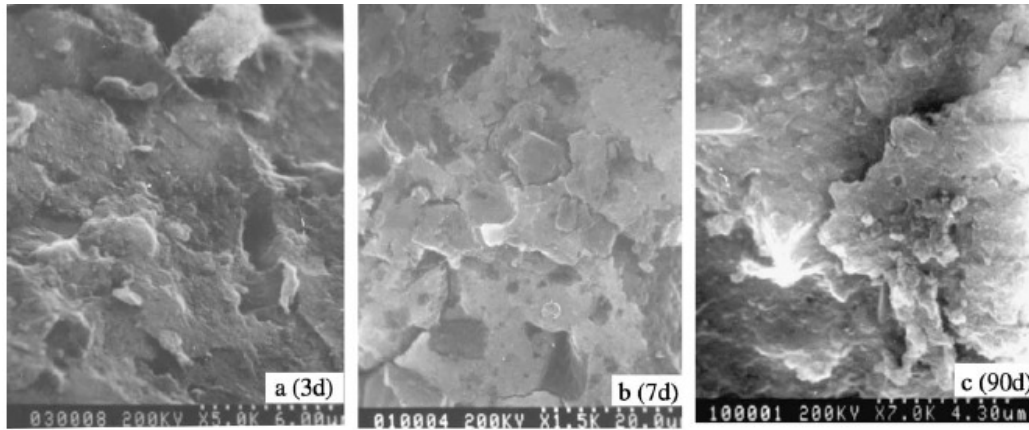


Gong ve Yang (2000), KÇ-YFC bağlayıcılarında hidrasyon ısı oluşumunu incelemiştir (Şekil 3.4). PÇ'de olduğu gibi, başlıca 3 hidrasyon piki (a, b, c) görülmüştür. PÇ'den farkı, pikler arasındaki mesafenin daha kısa olmasıdır. İlk pik, partiküllerin ıslanması ve çürüftan gelen  $\text{Ca}^{+2}$  ve cam suyundan gelen  $\text{SiO}_4^{-4}$  arasındaki reaksiyon sonucunda ilk C-S-H'lerin oluşumundan kaynaklanmaktadır. İkinci pik, çözültiden gelen  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$  ve  $\text{Mg}^{+2}$  ile çürüftan gelen  $\text{SiO}_4^{-4}$  arasındaki reaksiyon sonucunda ikincil C-S-H'lerin oluşumuna bağlanmaktadır. Son olarak, AA YFC-KÇ'un hidrasyon reaksiyonu farklı iyonların difüzyonuyla kontrol edilmektedir. Sodyum fosfat ilavesi ile piklerin oluştuğu zaman gecikmiş, yüksekliği ve genişliği azalmıştır (Şekil 3.4). Bir başka deyişle, sodyum fosfat hidrasyon reaksiyonlarını etkili bir şekilde geciktirmiştir. Sodyum fosfat varlığında yoğunluğu artan yeni bir faz tespit edilmiştir. Ayrıca,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  oluşmuştur. AA YFC-KÇ'nin hidrasyonunu geciktirmede bu da etkili olabilir. SEM analizlerinde, erken yaşlarda çok sayıda iğne şeklinde hidrasyon ürünü tespit edilmiştir. Sodyum fosfat varlığında oluşan bu ürünlerin bir membran oluşturarak tanelerin yüzeyini kapladığı ve hidrasyonu geciktirdiği düşünülmektedir. Zeolit benzeri hidrasyon ürünü tespit edilmemiştir.



Şekil 3.4 AA YFC-KÇ için ısı oluşum eğrileri (Gong ve Yang, 2000).

Zhihua, Dongxu, Jian ve Nanru (2003), KÇ (%30) ve YFC (%70) karışımını toz cam suyu ( $M_s=1,2$ ) ve sodyum alüminat klinkeri ile aktive ederek, makul priz sürelerinde ve dayanım gelişimi PÇ 52.5 çimentosuna benzer harçlar üretmiştir. Karbonatlaşma, deniz suyu, asit, sülfat çözeltileri ve donma-çözülme dayanıklılığı açısından PÇ'den daha iyi davranış sergilemiştir. AA YFC-KÇ yoğun, sıkı ve bütünleşmiş morfolojik özelliklere sahipken (Şekil 3.5), PÇ hamurları, bazı sıkı olmayan alanlar (Aft ve  $Ca(OH)_2$  gibi kaba hidratasyon ürünlerinden kaynaklanan) göstermiştir. Pan, Cheng, Lu ve Yang (2002), AA YFC-KÇ'nin hidratasyonundan oluşan C-S-H'nin daha düşük Ca/Si oranına sahip olduğunu, hemen hemen amorf ve çok ince partikül boyutlarında olduğu, Aft ve  $Ca(OH)_2$  gibi PÇ'nin hidratasyonunda oluşan ürünleri içermediğini göstermiştir. Bu morfolojik özellikler (daha yoğun yapı) ve daha iyi boşluk yapısı daha iyi dayanım performansı ve kimyasal etkilere mükemmel dayanıklılığa katkıda bulunmaktadır. Cıva porozimetresi ölçümleri, AA YFC-KÇ hamurlarının PÇ hamurlarına kıyasla daha düşük toplam poroziteye, daha az oranda büyük boyutlu boşluğa ve daha fazla oranda küçük boşluğa sahip olduğunu göstermiştir



Şekil 3.5 Farklı kür yaşlarında sertleşmiş AA YFC-KÇ hamurunun mikroyapısı (Zhihua, Dongxu, Jian ve Nanru, 2003).

### 3.2.3 YFC-SD Sistemleri

Rousekova, Bajza ve Zivica (1997), SD ve YFC esaslı bağlayıcıları alkali silika aktivatör (SFA) ile aktive ederek hidrolik bağlayıcı geliştirmeye yönelik araştırmalar yapmıştır. SFA, silis dumanından hazırlanmış çok etkili bir aktivatör olup, NaOH ve

cam suyundan bile daha etkilidir. En iyi hidrolik bağlayıcı özelliğini YFC/SD oranı 2 olan SFA aktivatörlü harç karışımı göstermiştir. SFA aktivatörü ile NaOH aktivatörüne kıyasla dayanımı ve suya dayanıklılığı daha yüksek kompozitlerin üretilebileceği görülmüştür.

Zivica (2006), silis dumanı alkali aktivatörünün (SFA) alkali aktivasyondaki etkinliğini incelemiştir. SFA aktivatörü, silis dumanı ve belli kompozisyondaki alkali bileşenin sulu çözeltisinin bir süspansiyonu olup, belli sıcaklıkta, belli süre kür edilerek elde edilmiştir. YFC bağlayıcılı harç %7 Na<sub>2</sub>O ile aktive edildiğinde 90 günde 9 MPa, SFA ile aktive edildiğinde ise 33 MPa dayanım göstermiştir. SFA kullanımı, toplam poroziteyi azaltmış (boşluk yapısının yoğunlaşması), ortalama boşluk çapını ve makro boşluk oranını arttırmıştır (boşluk yapısının heterojenliğinde artış). Bu iki durumdan biri dayanımı arttırıcı diğeri ise azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Sonuç olarak, silis dumanı aktivatörünün çok etkili bir alkali aktivatör olduğu, pozitif etkisinin C-S-H ürünlerinin yoğunluğunun artmasına ve boşluk yapısının yoğunlaşmasına dayandığı belirtilmiştir.

### **3.2.4 YFC-UK Sistemleri**

Smith - Osborne (1977) ve Bijen - Waltije (1989), %60 YFC+%40 UK kombinasyonunu %7 NaOH ile aktive etmiştir. Smith ve Osborne (1977), erken dayanım özelliklerinin iyi, ancak 28 günün ötesindeki dayanım artışının düşük olduğunu bulmuştur. Bijen ve Waltije (1989), bu bağlayıcıların YFC+PÇ referans bağlayıcı sisteminden daha hızlı karbonatlaştıklarını ve karbonatlaşma sonucunda önemli derecede dayanım kaybına uğradıklarını bulmuştur (Puertas ve Fernandez-Jimenez, 2003).

Shi ve Day (1999), NaOH ve sodyum silikat ile aktive edilmiş UK/YFC karışımları üzerinde yaptıkları deneylerde, az miktarda hidrate kireç ilavesinin erken yaştaki dayanımı önemli derecede arttırdığını, ileriki yaşlarda ise bir miktar azalttığını bildirmiştir.

Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso ve Vazquez (2000), NaOH ile UK/YFC karışımlarının aktivasyonunu incelemiştir. YFC oranının artmasıyla dayanım artmıştır. Kür sıcaklığının dayanıma etkisi, UK/YFC oranı ve aktivatör konsantrasyonu yanında daha düşük seviyede olmuştur. Yüksek aktivatör konsantrasyonlarında, YFC yerine %50 UK ikamesi ile %100 YFC bağlayıcı karışıma benzer performansta harçlar üretilebilmiştir. XRD analizleri, 2 M NaOH'da (hem 25 hem 65 °C) tek kristalin reaksiyon ürününün kalsit olduğunu göstermiştir. 10 M NaOH'da, kalsit yanında hidrotalsit ve pirssonite ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) mevcut olduğu görülmüştür. Tüm difragtomlarda kambur tespit edilmiş olup, diğer düşük kristalinitedeki bileşenlerin varlığını göstermektedir. Bu difraksiyonlar UK'dan gelen kuvars ve mulite karşılık gelmektedir. Deney sonuçları 10 M NaOH ile %50 UK+%50 YFC karışımı aktive edildiğinde, YFC'nin hemen hemen tamamıyla çözüldüğünü, UK'nın ise daha düşük hızda ve daha düşük oranda çözüldüğünü göstermiştir. Çözülme, yoğunlaşma ve çökeltme sonucunda, yapısında Al ve alkalin iyonlar içeren amorf hidrate kalsiyum silikat (C-S-H jeli benzeri) oluşmuştur. UK'nın alkali aktivasyonun karakteristik yapısı olan 3 boyutlu hidrate alkalin alüminosilikat oluşmamıştır.

Puertas ve Fernandez-Jimenez (2003) 10 M NaOH ile aktive edilen %50 UK+%50 YFC karışımını 22 ve 65 °C (5 saat) sıcaklıkta kür etmiştir. Daha sonra, tüm karışımlar %98 bağıl nemde ve 22 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Yedinci günde her iki kür yöntemi ile benzer basınç dayanımları elde edilirken, 28. günde oda sıcaklığında kür ile daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Kür süresindeki artışla çözünmeyen kalıntı miktarı (UK'ya karşılık gelir) azalmıştır. XRD analizleri kristalin reaksiyon ürünlerinin kalsit, hidrotalsit ve düşük oranda  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  olduğunu göstermiştir. Tüm difragtomlarda kambur tespit edilmiş olup, diğer düşük kristalinitedeki bileşenlerin (UK'dan gelen kuvars ve mulite) varlığını göstermektedir. NMR ve SEM/EDS aktive edilmiş hamurlarda C-S-H ve alkalin alüminosilikat varlığını göstermiştir. Ana reaksiyon ürünü olan C-S-H'nin ortalama atomik oranları: Ca/Si ~0,8, Al/Ca ~0,6, Si/Al ~2-3 olarak bulunmuştur. Bu analiz C-S-H'nin Al bakımından zengin olduğunu ve yapısında Na içerdiğini doğrulamaktadır. Alkalin çözeltiye ilave edilen Na'un %30-40'ı hamur tarafından

sabitlenmiştir. SEM analizleri reaksiyon kabuğunun alüminosilikat olduğunu göstermiştir. Reaksiyona girmemiş UK, UK'nın reaksiyon ürünleri (Si, Al ve Na içeren, Ca içermeyen) ve yüksek derecede Ca içeren ana matris SEM ile görüntülenmiştir. Sonuç olarak, kür koşullarından bağımsız olarak UK/YFC harçlarında iki farklı ürün oluşmuştur: Ana reaksiyon ürünü, YFC'nin aktivasyonu ile oluşan düşük kristaliniteli C-S-H, ikinci reaksiyon ürünü ise UK'nın aktivasyon ürünü olan zeolitik jel tipi 3 boyutlu amorf alkalın alüminosilikattır.

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999a), %4 Na içeren ve  $M_s$  değeri 0,75 olan sıvı sodyum silikat ile aktive ettiği %30 UK/%70 YFC karışımının, UK'nın bu seviyede Na ile iyi bir şekilde aktive olamamasından dolayı, düşük dayanım gösterdiğini belirtmiştir.

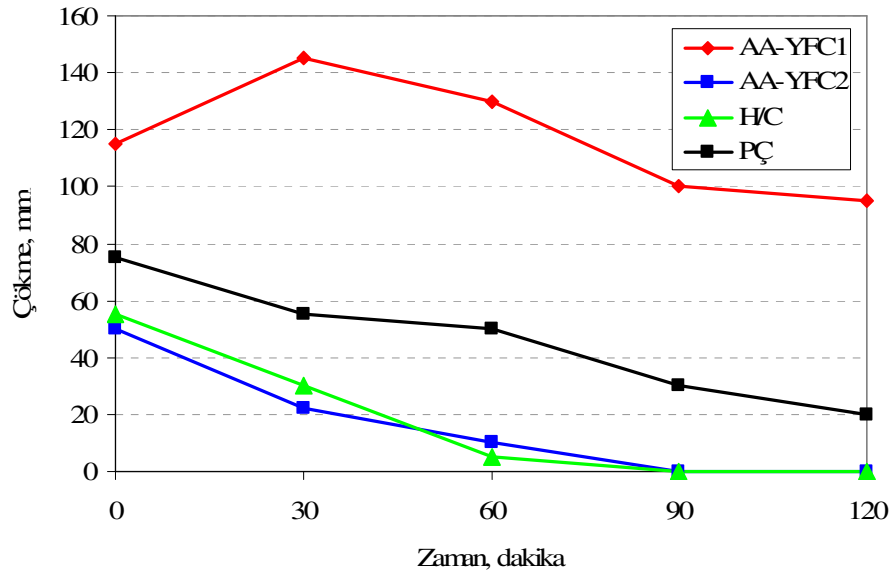
### 3.3 İşlenebilirlik

İşlenebilirlik ve erken dayanım, aktivatörün tipine, cürufun kompozisyonu ve inceliğine duyarlıdır. En yaygın olarak kullanılan aktivatör olan sodyum silikatlarda, NaOH dozajına ve  $M_s$  değerine de bağlıdır. Çoğu durumda yüksek 1 günlük dayanım 45 dakikanın üzerinde hızlı işlenebilirlik kaybını beraberinde getirmektedir (Collins ve Sanjayan, 1999a).

Collins ve Sanjayan (1999a), toz sodyum silikat+hidrate kireç (AA-YFC1), sıvı sodyum silikat+hidrate kireç (AA-YFC2) ve NaOH+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (H/C) aktivatörleri ile YFC'yi aktive ederek beton karışımları hazırlamıştır. AA-YFC1 diğer beton karışımlarına göre önemli derecede daha iyi işlenebilirlik göstermiştir. Toz sodyum silikat kullanımında (AA-YFC1), 30. dakikada başlangıç çökme değerinden daha yüksek çökme elde edilmiş olup en az çökme kaybı gösteren betondur. Düşük çökme kaybı, toz sodyum silikatın alkalileri sisteme daha yavaş hızda serbest bırakmasıyla ilgilidir. AA-YFC2 ve H/C betonu önemli derecede işlenebilirlik kaybı göstermiştir (Şekil 3.6). AA-YFC betonları PÇ betonlarına kıyasla daha fazla hava sürüklemiş, daha az kuma göstermiştir. AA-YFC2, PÇ ve H/C betonları hızlı erken dayanım kazanmasına rağmen, H/C ileriki yaşlarda PÇ ve AA-YFC2'nin altında dayanım

göstermiştir. Ayrıca, AA-YFC1 betonlarının kür hassasiyetinin PC betonlarına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür (Collins ve Sanjayan, 1999a).

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2000), sıvı aktivatör ve toz aktivatör kullanımı durumunda dayanım farkının 7 günden sonra kaybolduğunu bildirmiştir. Sıvı aktivatör kullanıldığında, daha yüksek erken dayanım, fakat AA-YFC'nin hızlı reaksiyonundan ve hızlı sertleşmesinden ötürü daha kötü işlenebilirlik ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, toz sodyum silikat higroskopik özelliğinden ötürü sadece kuru iklim koşullarında kullanılmaya elverişlidir.



Şekil 3.6 AA YFC betonlarında işlenebilirliğin zamana bağlı olarak değişimi (Collins ve Sanjayan, 1999a).

Collins ve Sanjayan (1999b), YFC yerine %10 yoğunlaştırılmış silis dumanı (CSF), çok ince cüruf (UFS) ve çok ince uçucu kül (UFA) ikamesinin işlenebilirlik ve dayanım gelişimi üzerindeki etkisini incelemiştir. Aktivatör olarak, toz sodyum metasilikat ve hidrate kireç kullanılmıştır. AA-YFC betonları PÇ betonuna kıyasla önemli derecede daha iyi işlenebilirlik göstermiştir ve daha düşük düzeyde çökme kaybı göstermiştir. Silis dumanı ikamesi AA-YFC betonunun işlenebilirlik ve çökme kaybını önemli derecede kötü etkilemiştir. AA-YFC/UFS betonunun işlenebilirliği

AA-YFC betonuna kıyasla, biraz daha düşük olmakla birlikte PÇ betonundan daha iyidir. Ayrıca, 2 saat zarfında en düşük oranda çökme kaybı gösteren betondur. AA-YFC/UFA betonu ise en yüksek işlenebilirlik değerine sahip betondur. AA-YFC/UFS, AA-YFC/UFA ve AA-YFC/CSF betonlarının 1 günlük dayanımı AA-YFC betonuna kıyasla, sırasıyla %28, %24 ve %10 oranında daha fazladır. AA-YFC tüm yaşlarda PÇ betonundan daha yüksek dayanım göstermiştir. PÇ betonunda dayanım gelişimi 56. günün ötesinde dururken, AA-YFC betonunda devam etmiştir. AA-YFC/CSF betonu 3 günün ötesinde tüm yaşlarda en iyi dayanım gelişimi göstermiştir.

### 3.4 Kür Koşulları

Fernandez-Jimenez, Palomo ve Puertas (1999), AA YFC betonlarında kür sıcaklığının artmasının  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  aktivatörlü sistemde dayanımda artışa,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$  aktivatörlü sistemde ise azalışa yol açtığını bildirmiştir. Puertas, Martinez-Ramirez, Alonso ve Vazquez (2000), 65 °C sıcaklıkta kür ile 1. günde daha yüksek dayanımlar elde edilse de, ileriki yaşlarda 25 °C sıcaklıkta kür edilene kıyasla daha düşük dayanımlar elde edildiğini bildirmiştir. Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999a) da bu sonuçları desteklemiştir. Kür sıcaklığındaki artış erken yaşlardaki dayanımları daha fazla arttırır. Bununla birlikte, ilerleyen yaşlarda reaksiyon süresi arttıkça kür sıcaklığının artışı sonuç dayanımı azaltır. Bu olayın açıklaması şu şekildedir: Yüksek sıcaklıklar reaktif türlerin çözünmesine yardım eder. Böylece, erken yaşlarda büyük miktarda reaksiyon ürünü oluşur. Bu ürünler daha heterojen ve daha sıkı dağılımlı olup, mikroyapıları düşük sıcaklıklarda kür edilenlerden farklıdır. Bu nedenle, reaksiyon zamanı ilerledikçe difüzyon prosesinin gerçekleşmesi daha fazla zorlaşır ve reaksiyon daha yavaş ilerler.

Jaarsveld, Deventer ve Lukey (2002) AA metakaolin/uçucu kül karışımları için bazı kür sıcaklıklarının dayanım artışına neden olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, uzun kür süreleri aşırı büzülme nedeniyle malzeme yapısını zayıflatmaktadır. Pinto (2004) suyun buharlaşmasını önlemek için sertleşmiş numunelerin izolasyona ihtiyaç olduğunu savunmuştur. Brough ve Atkinson (2002), cam suyuyla aktive edilmiş cüruf için 20 °C'de kür edildiğinde, 7 MPa olan

dayanımın 12 saat 80 °C’de kür ile 72 MPa’ya ulaştığını bildirmiştir. Wang, Scrivener ve Pratt (1994) alkalilerle aktive edilmiş YFC için, kür sıcaklığının aktivatör yapısına bağlı olduğunu ve yüksek oranda aktivatör kullanıldığında önemsiz olduğunu bildirmiştir. Kirschner ve Harmuth (2004) en yüksek dayanımı AA metakaolini 75 °C sıcaklıkta 4 saat kür ettiğinde elde etmiştir. Ayrıca, su kürünün dayanım azalmasına neden olduğunu doğrulamıştır. Criado, Palomo ve Fernandez-Jimenez (2005), UK’nın alkali aktivasyonunu incelemiştir. Belli kür koşullarında karbonatlaşmanın artmasının, pH’ı ve dayanımı azaltması nedeniyle, örneklerin izolasyonunu önermiştir. Sonuç olarak, kür esnasında buharlaşma yoluyla su kaybı dayanım kaybına yol açar. Aynı zamanda kür sıcaklığına maruz kaldıktan sonra, cam suyu veya NaOH esaslı örnekler dayanım kaybını önlemek için yalıtılmalıdır (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali, 2008b).

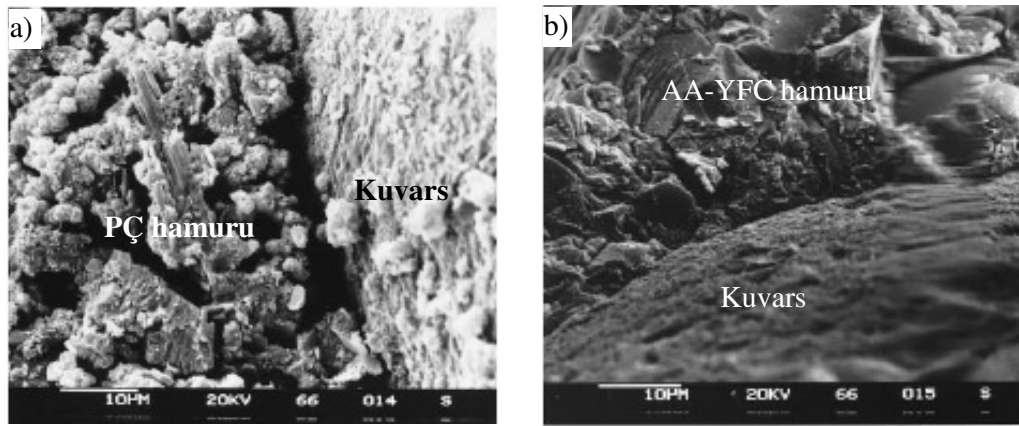
Collins ve Sanjayan (2001), toz sodyum silikat ve hidrate kireç ile aktive ettiği YFC betonlarını su içerisinde, polietilen ile kaplayarak ve havada kür etmiştir. Polietilen kaplı numunelerin dayanımı su içinde kür edilenlerden daha düşük olmuştur (1 yılda %21). En düşük dayanım, havada kür edilen numunelerden elde edilmiştir. Su içerisinde ve polietilen kaplanarak kür edilen numunelerde görülebilir çatlak gelişmezken, havada bekletilen numunelerde çatlaklar oluşmuştur. Çatlak oluşumu, yüzeyin çok kuru olması ve aynı zamanda rijit iri bazalt agregalarının hamurun büzülmesini önlemesine bağlanmıştır. Su kürü yapılmış ve polietilen ile kaplanmış numunelerin boşluk boyutu dağılımlarının hemen hemen aynı olduğu, havada bekletilen numunelerin ise önemli derecede daha iri olduğu görülmüştür. Havada kür edilen numunelerde birbirleriyle bağlantılı bir mikro çatlak ağının olduğu ve zamanla daha uzun ve sürekli bir hal aldığı görülmüştür. Bu daha düşük basınç dayanımının da muhtemel açıklamasıdır.

### 3.5 Agrega-Hamur Ara Yüzeyi

PÇ harçlarında dubleks film olarak adlandırılan ince bir ürünler katmanı kum tanelerinin yüzeyi üzerine yapışmıştır. Bunun ötesinde, 40-60 µm kalınlığında gözenekli bir geçiş bölgesi vardır. Poroz geçiş bölgesinde yüksek yoğunlukta Ca(OH)<sub>2</sub> kümesi (c eksenine kum tanesine paralel) gözlenmiştir (Şekil 3.7a). XRD



analizinde PÇ hamurunda varlığı tespit edilen AFt (etrenjit) ara yüzeyde tespit edilememiştir. Zamanla gözenekli geçiş bölgesi daha ince ve yoğun olmaya başlamıştır. Bununla birlikte, alkalilerle aktive edilmiş harçlarda ara yüzey daha yoğun ve üniformdur (Şekil 3.7b). Alkalilerle aktive edilmiş cüruf hamurları ve kum taneleri arasında gözenekli bir tabaka oluşmamıştır.  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ile aktive edilmiş YFC harçlarındaki yoğun ve üniform geçiş bölgesi,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 'ün su azaltıcı etkisine, boşluk çözeltisindeki  $[\text{SiO}_4]^{-4}$ 'ün yüksek başlangıç konsantrasyona ve yüksek pH'lı ortamda kuvarın artan çözünmesine bağlanmaktadır (Shi ve Xie, 1998).



Şekil 3.7 Agrega-hamur geçiş bölgesi a) PÇ hamuru, b) AA-YFC hamuru (Shi ve Xie, 1998).

### 3.6 Alkalilerle Aktive Edilmiş YFC Bağlayıcıların Sorunlu Yönleri

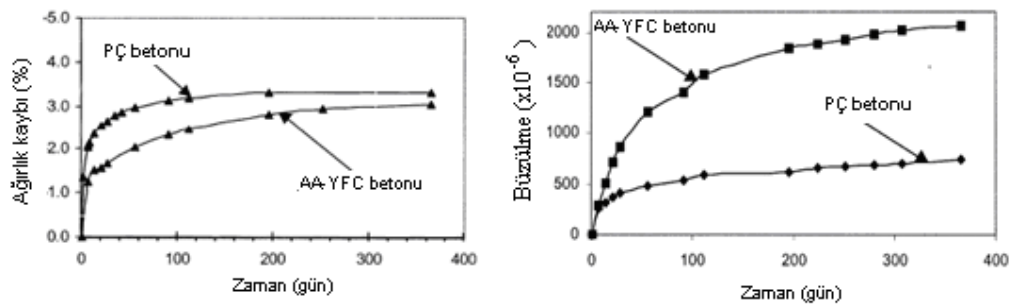
AA-YFC betonları sundukları önemli avantajlar yanında; hızlı priz, yüksek büzülme, çiçeklenme, yapışkan kıvamlı olması gibi bir takım sorunlara sahiptir. Ayrıca, aktivatör çözeltilerinin elle temasına büyük dikkat gösterilmelidir. Alkali-agrega genleşmeleri ve karbonatlaşma bakımından ise literatürde çelişkili sonuçlar mevcut olup, bu konularla ilgili ayrıntılı bilgi 4. bölümde sunulmuştur.

#### 3.6.1 Kuruma Büzülmesi

Büzülme genellikle aktivatör dozajının ve cürufun inceliğinin artması ile artar. Aynı zamanda, sodyum silikat esaslı aktivatörler sodyum hidroksit ve sodyum

karbonat esaslı malzemelere kıyasla daha fazla büzülme gösterirler (Neto, Cincotto ve Repette, 2008).

Collins ve Sanjayan (1999a) tarafından yapılan çalışmalar AA-YFC betonlarının kuruma büzülmesinin PÇ betonuna kıyasla daha yüksek düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Collins ve Sanjayan (2000b) boşluk boyutu dağılımının AA-YFC betonlarının kuruma büzülmesine etkisini incelemiştir. Aktivatör olarak toz sodyum metasilikat ve hidrate kireç kullanılmıştır. Şekil 3.8'den görüldüğü gibi, AA-YFC betonlarının su kaybı PÇ betonlarına kıyasla daha düşük olmasına rağmen, önemli derecede daha yüksek oranda kuruma büzülmesi göstermiştir. Cıva porozimetresi ölçümleri, AA-YFC hamurlarının PÇ hamurlarına göre daha ince bir boşluk boyutu dağılımına sahip olduğunu göstermiştir. Mezo boşlukların AA-YFC hamurlarında PÇ hamurlarına kıyasla daha yüksek oranda olması daha yüksek kuruma büzülmesinin sebebinin açıklamaktadır. AA-YFC hamurlarında makro boşluklar önemli derecede daha azdır. Bu yüzden suyun kuruması mezo boşlukları PÇ hamurlarına kıyasla çok daha hızla etkiler. Bu, kuruma esnasında AA-YFC betonlarında ağırlık kaybı daha fazla olmasına rağmen, AA-YFC betonlarında kuruma büzülmesinin PÇ betonlarına kıyasla daha fazla olmasının sebebinin açıklamaktadır. Wittmann (1982) ve Young (1988) da boşluk boyutu dağılımının ve C-S-H jelinin özelliklerinin kuruma büzülmesinin büyüklüğü üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 3.8 PÇ ve AA-YFC betonlarının ağırlık kayıpları ve kuruma büzülmesi (numuneler 1. günden sonra %50 BN ve 23°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır) (Collins ve Sanjayan, 2000b).

Collins ve Sanjayan (1999c), iri agrega olarak gözenekli agrega kullanımının AA-YFC betonlarının dayanım ve büzülme özelliklerine etkisini incelemiştir.

Hazırlanan karışımlar araştırmacılar tarafından 2000 yılında yapılan ve ayrıntıları yukarıda verilen çalışma ile aynıdır. Su kürü durumunda, crf agregalı betonun dayanımı bazalt agregalıya kıyasla daha düşük iken, %50 BN'li ortamda crf agregalı betonun dayanımı 1. günün ötesinde daha yüksek bulunmuştur. Kuruma büzülmesi de, gözenekli agrega kullanımını durumunda önemli oranda azalmıştır. Artan dayanım ve azalan kuruma büzülmesi, agregadan yavaş yavaş betonun içine serbest bırakılan suyun daha fazla hidrate hamur oluşturarak yarattığı içsel kr etkisine bağlanmıştır.

Collins ve Sanjayan (2000a) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada, AA-YFC betonlarında çatlama eğilimini belirlemek amacıyla donatılı kiriş numuneleri üzerinde engellenmiş rötre davranışı incelenmiştir. Hazırlanan karışımlar araştırmacılar tarafından 2000 yılında yapılan ve ayrıntıları yukarıda verilen araştırma ile aynıdır. Atmosfer koşullarına maruz bırakılan AA-YFC kirişleri 1 gün içinde, P kirişleri ise 9. günde çatlamıştır. Su içerisinde kr yapıldığında ise, hemen hemen P betonlarına benzer performansa ulaşılmıştır. Büzülme azaltıcı katkılar, atmosfer koşullarına maruz bırakılan AA-YFC betonlarının çatlama zamanını geciktirmezken, bir süre su kürü yapılanlarda olumlu etkiler yaratmıştır. Çatlama davranışı açısından en iyi performans, iri agrega olarak crf kullanılan seriden elde edilmiştir.

Collins ve Sanjayan (1999d), 80x80 cm kesitli, 120 cm yükseklikli kolon elemanlar üzerinde dayanım ve büzülme özelliklerinin değişimini incelemiştir. Aktivatör olarak sodyum metasilikat ve hidrate kireç kullanılmıştır. AA-YFC betonları minimum düzeyde okme kaybı göstermiştir. Bu durum, sodyum silikatın yavaş znmesi ve su azaltıcı özelliği ile ilgilidir. Aktivatörün znmesinin yavaş olması ve endotermik reaksiyon yapması, daha düşük ısı gelişimine katkıda bulunmuştur. Yapısal kolon elemanından alınan karot numuneleri, yerindeki dayanımın 28 ve 91. günde P betonuna yakın olduğunu göstermiştir. Kesit içinde kolon merkezine yaklaştıca dayanım, kuruma etkilerinin merkeze doğru gidildikçe azalması nedeniyle, artmıştır. Kolonun i kısmıyla dış kısmı arasındaki dayanım farkı %10 olup, YFC-P betonundaki farktan daha azdır. Kolonun merkezi ile köşesi

arasındaki deformasyon farkı 91. günde  $149 \times 10^{-6}$  olarak belirlenmiştir. Bu değer PÇ betonun çatlaması için yeterli bir değerken, AA-YFC betonunda çatlak oluşmamıştır. Bu durum, AA-YFC betonunun daha yüksek çekme deformasyonu veya daha yüksek çekme dayanımı kapasitesine sahip olmasıyla ilgilidir.

Chang, Yeih ve Hung (2005) alçı taşı ilavesinin sodyum silikat esaslı AA-YFC hamurlarının kuruma büzülmesini azalttığını bildirmiştir. AA-YFC'nin yüksek kuruma büzülmesi neme hassas silika jelinin oluşumuna ve boşluk boyutu dağılımına bağlanmaktadır. Bilindiği gibi, boşluk boyutu dağılımı kuruma büzülmesi üzerinde çok önemli etkiye sahiptir. AA-YFC betonlarında mikro boşlukların oranı PÇ'den daha fazla iken, kapiler boşluk sayısı PÇ'den daha azdır. AA-YFC hamurlarında alçı taşı kullanımı daha fazla C-S-H jeli oluşumuna neden olduğu için, mikro boşluk oluşumunu artırır ve sonuç olarak kuruma büzülmesi azalır. Alçı taşı ilavesi ile, basınç dayanımı da artmaktadır. Alçı taşı ve fosforik asidin birlikte kullanımı halinde, alçı taşı kuruma büzülmesini uzun süre koruyamamıştır.

Palacios ve Puertas (2007), büzülme azaltıcı katkıların cam suyu ile aktive edilmiş YFC harçlarının özelliklerine etkisini incelemiştir. Büzülme azaltıcı katkılar YFC ağırlığının %2'si oranında kullanıldığında hem otojen büzülme, hem de kuruma büzülmesini %50 oranında azaltmıştır. Bu durum, büzülme azaltıcı katkının boşluk suyunun yüzey gerilimini azaltmasına ve boşluk boyutu dağılımında değişime yol açmasına bağlanmıştır. Katkının varlığı, çapları 1 ile 0,1  $\mu\text{m}$  aralığındaki boşlukların oranını arttırmıştır. Bu boşluklardaki kapiler gerilmelerin daha küçük boşluklardakinden çok daha düşük olduğu bilinmektedir.

Bakharev, Sanjanyan ve Cheng (2000), kimyasal katkıların AA-YFC betonlarının düşük işlenebilirlik ve yüksek kuruma büzülmesi problemlerini çözmeye etkinliğini araştırmıştır. Aktivatör olarak, sıvı sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımı ( $M_s=0,75$  ve  $1,25$ , cüraf ağırlığının %4-7 Na) ve çok bileşenli aktivatör ( $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ -cüraf ağırlığının %8 Na) kullanılmıştır. Hava sürükleyici katkı, büzülme önleyici katkı ve alçı taşı AA-YFC betonlarında büzülme azaltmada etkili bulunmuştur. İşlenebilirliği de geliştirdiğinden AA-YFC betonlarında kullanımı en

uygun olan katkının hava sürükleyici katkı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, %5 oranında çok ince YFC ikamesi işlenebilirliği ve dayanımı geliştirmiştir.

Neto, Cincotto ve Repette (2008), harç karışımlarını sodyum silikat ( $M_s=1,7$ ) ile YFC kütlelerinin %2,5, %3,5 ve %4,5'i oranında  $Na_2O$  ihtiva edecek şekilde aktive etmiştir. Sodyum silikat içeriğinin artması ile daha yoğun hidrasyon sonucunda toplam porozite azalmıştır. En büyük boşluk boyutu  $Na_2O$  oranındaki artışla azalmıştır. Sodyum silikat aktivatör, otojen büzülme oluşumunu belirleyen faktörler olan mekanik özellikler, porozite ve hidrasyon derecesini büyük oranda etkiler. Sodyum silikat oranının artışı, öz kuruma ile doğrudan ilişkili olan toplam poroziteyi azaltır ve mezo boşlukların hacmini artırır. Dahası, aktivatör miktarının artması ile hidrasyon derecesi ve kimyasal büzülmeyle ilişkili otojen büzülme artar. AA-YFC'nin toplam porozitesi Portland çimentosuna yakın veya daha düşüktür. Bununla birlikte boşluk boyutu dağılımı yüksek hacimde jel boşlukları ile karakterize edilir. Otojen büzülme, kimyasal büzülme ve öz kuruma etkilerinin makroskobik sonucu olarak tanımlanabilir. Bu nedenle AA-YFC'nin yüksek otojen büzülmesi, çok yüksek miktarda kimyasal büzülme ve öz kurumadan kaynaklanan yüksek kapiler basınca bağlanabilir. YFC'nin %2,5, %3,5 ve %4,5'i oranında  $Na_2O$  içeren sodyum silikat aktivatörlü harçlar için, otojen büzülme 28. günde kuruma büzülmesinin sırasıyla %72, %30 ve %30'nu oluşturmaktadır. Buharlaşmayla kaybolan suyun AA-YFC'nin yüksek toplam büzülmesi ile alakalı olmadığı görülmüştür. Burada, su kaybı hidrasyon derecesi ve poroziteye bağlıdır. Buharlaşmayla kaybolan su miktarının toplam büzülmeyle ilişki göstermemesinin nedeni, otojen büzülmenin toplam büzülmenin önemli bir kısmını oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Sodyum silikat miktarındaki artış toplam büzülmeyle artırmaktadır. Aktivatör miktarındaki artış, hidrasyon derecesini artırır. Bunun sonucunda, C-S-H hacmi artar, porozite azalır. Bu faktörler, büzülmenin ana mekanizması üzerinde etkilidir (Neto, Cincotto ve Repette, 2008).

### **3.6.2 Priz Süresi**

Birçok araştırmacı tarafından alkalilerle aktive edilen YFC betonlarının ani priz davranışı rapor edilmiştir. Hızlı işlenebilirlik kaybına neden olan bu olay bu

malzemenin uygulamada kullanılmasına engeldir. En iyi dayanım gelişimi performansını sunan sodyum silikat esaslı aktivatörlerde hızlı priz problemi daha belirgindir. Yüksek erken dayanım ve hızlı işlenebilirlik kaybı arasında bir ilişki olduğu bildirilmiştir. Geciktirici maddelerin kullanımı ise etkili bir yoldur. PÇ karışımlarında kullanılan kimyasal katkıların bu amaçla kullanımı, C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S bileşenlerinin olmamasından ve alkalın bileşenlerin varlığından ötürü bazı durumlarda PÇ'den farklı olmuştur (Yang, Song, Ashour ve Lee, 2007; Chang, 2003; Zivica, 2007).

Chang (2003), sodyum silikat esaslı aktivatör kullanılarak hazırlanan çözeltinin alkali modülü (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O) arttıkça, pH değerinin azaldığını belirtmiştir. Sabit çözelti/YFC oranında, hem alkali modülü ile hem de pH değeri ile priz başlangıç ve bitiş süresi arasında anlamlı bir ilişkinin olmadığı görülmüştür. Na<sub>2</sub>O konsantrasyonunun artması aktivatörün pH'ını arttırırken, SiO<sub>2</sub> konsantrasyonunun artması azaltmıştır. Aktivatör dozajının artması priz sürelerinde kısaltmaya neden olmuştur. Fosforik asit konsantrasyonu 0,84 M değerini aştığında priz süresinde ani bir artış oluşmuş, 0,87 M olduğunda ise 6 saate çıkmıştır.

Geciktirici olarak borat ve fosfat kullanılarak, PÇ'ye benzer priz süreleri elde edilebilmektedir. Gong ve Yang (2000), sodyum fosfatın, cam suyu ve NaOH karışımı ile aktive edilmiş, kırmızı çamur (%30), YFC (%70) karışımının priz süresini uzattığını bildirmiştir.

Zivica (2007) tarafından YFC ağırlığının %3, %5 ve %7'si oranında sodyum hidroksit, sodyum karbonat ve sodyum silikat (M<sub>s</sub>=1,13) aktivatörleri kullanarak çeşitli harç karışımları hazırlanmıştır. AA-YFC harçlarının işlenebilirliğinin PÇ harçlarına kıyasla (%5 ve %7 sodyum silikat içeren karışımlar haricinde) biraz daha iyi olduğu görülmüştür. NaOH ve kısmen Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aktivatörü için priz sürelerinin dozajdan bağımsız ve makul sınırlar içinde olduğu görülmüştür. Sodyum silikat kullanımı halinde ise, dozajın artması ile priz süreleri önemli derecede kısaltmıştır. Sodyum silikat dozajı %3 olduğunda 40 dakika olan priz başlangıcı, dozajın %7'ye çıkmasıyla 0 dakikaya, priz sonu ise 1:20'den 0:30'a düşmüştür. NaOH ve Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

için sıcaklığın 26 °C'ye kadar artışı priz süresini uzatmış, işlenebilirliği arttırmıştır. Sıcaklığın daha fazla artmasıyla ise, priz başlangıç süresi ve işlenebilirlik önemli ölçüde azalmıştır. Sodyum silikat kullanımı halinde ise, başlangıç prizi ve işlenebilirlik sıcaklığın artışıyla azalmıştır. Görüldüğü gibi, aktivatörün tipi ve dozajı AA-YFC'nin taze hal özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Sodyum silikatın prizin hızlanması ve işlenebilirlikteki kayıp açısından etkisi sodyum hidroksit ve sodyum karbonata göre daha fazladır. Bu sonuçlar, hidrasyonun başlangıç fazlarının oluşumunda sodyum silikatın etkisinin diğer aktivatörlere kıyasla daha belirgin olduğunu gösterir. Gözlenen farklı etkilerin aktivatörlerin anyon ve katyon tipindeki farklılıktan kaynaklandığı kuşkusuzdur.  $M_s$  değeri 1:1 ile 1:2 arasında olan sodyum silikat büyük oranda  $SiO_3^{2-}$  iyonları içerir. Bununla birlikte, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat çözeltileri sodyum silikata kıyasla basit katyonlar ( $Na^+$ ) ve anyonlar ( $OH^-$  ve  $CO_3^{2-}$ ) içerirler. Dahası, silikat iyonları AA-YFC bağlayıcılarının sertleşmesinde önemli ve sonuçlandırıcı bileşendir. Sodyum silikat sistemlerinde silikat, çözeltiye eklenme anında mevcuttur. Bu durum, hızlı priz ve hızlı işlenebilirlik kaybında etkilidir. Kalorimetre deneyleri, sodyum silikatın durgun evreyi (induction periyod) kısalttığını, bununla birlikte sodyum hidroksit ve sodyum karbonatın durgun evre üzerinde bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Sodyum silikat içeren YFC hamurlarının hızlı prizin, başlangıç C-S-H'nin oluşumundan kaynaklandığı belirtilmektedir. Sodyum hidroksitle aktive edilendeki prizin ise, daha fazla polisilikat hidratın oluşumundan kaynaklandığını göstermiştir. Sodyum karbonatla aktive edilen hamurların daha uzun priz süresi, reaksiyonları geciktirici özelliğe sahip kalsiyum karbonat oluşumuna bağlanmıştır. Kullanılan aktivatörlerin pH değerlerinin oldukça yüksek olduğu ve priz üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak, bazik pH değeri YFC'nin hidrasyon kapasitesi açısından gerekli ve önemlidir. Çözeltinin pH değeri C-S-H'nin hidrasyon ürünlerinin yapısını belirleyen hidrasyon prosesi üzerinde önemli bir rol oynar. pH 9,5'un altında olduğunda bu mümkün değildir (Zivica, 2007).

Chang, Yeih ve Hung (2005), fosforik asidin sodyum silikat esaslı AA-YFC hamurlarının priz süresi üzerindeki etkisini incelemiştir. Fosforik asidin geciktirici etkisi belli bir kritik değer altında önemsizken, kritik değere ulaşıldığında priz

süresi hızla artmış ve makul bölgenin dışına çıkmıştır. Bir başka deyiş ile, priz süresi fosforik asit konsantrasyonuna çok hassastır. Ayrıca, priz başlangıcı ve priz sonu arası çok kısa olup, 20 dakikadır. Çözelti/YFC oranı azaldıkça, aynı geciktirici etki için daha fazla fosforik asit gerekmektedir. Gong ve Yang (2000)'a göre,  $Ca_3(PO_4)_2$  oluşumu alkalilerle aktive edilmiş cüruf-kırmızı çamur hamurlarının prizinin gecikme nedenlerinden biridir. Shkolnick (1986), sodyum silikat esaslı AA-YFC hamurların hızlı prizini C-S-H jelinin birkaç dakika içinde hızla oluşumuna bağlamıştır. Alçı taşı ilavesi ise priz sürelerini kısaltmıştır. Bu durum şu nedenlere bağlanır. İlk olarak, alçı taşı ilave edildiğinde ısı oluşmaktadır. Termodinamiğe göre, yüksek sıcaklıklar altında taneler daha yüksek serbest enerjiye sahiptir. Bu nedenle, kimyasal reaksiyon hızı artar. Ayrıca, alçı taşı kullanıldığında sıvı faza ilave kalsiyum iyonu girer. Daha yüksek alçı taşı konsantrasyonu, daha öncede açıklandığı gibi, C-S-H jelinin daha yüksek hızda oluşumu ile sonuçlanır. Sonuç olarak, alçı taşı ilave edildiğinde daha hızlı priz ortaya çıkar. Fosforik asit ve alçı taşının birlikte kullanımı durumunda ise, priz süresi ve kuruma büzülmesi açısından sorunsuz karışım elde edilememiştir.

### 3.7 Uygulama Alanları

Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar keşfedildikten sonra (1958), eski Sovyetler birliği, Çin ve bazı diğer ülkelerde ticari olarak üretilmiş ve çeşitli inşaat projelerinde kullanılmıştır. 1999-2000 yıllarında bir grup Ukraynalı bilim adamı, alkalilerle aktive edilmiş YFC betonu ile inşa edilmiş birçok beton yapıyı incelemiştir. Bunlar arasında, drenaj kollektörü (1966, Odessa, Ukrayna), yem deposu, demiryolu şev betonu ve yerinde dökme beton inşaat alanları (1982), biri 2 katlı diğeri 15 katlı konut inşaatı (1960), 1999-2000 yılları arasında yapılmış inşaatlar ve betonlar, ağır yüklü (50-60 ton) kamyon trafiğine açık döşemeler (1984), 24 katlı konut binası (1994) ve ön gerilmeli donatılı beton demiryolu traversleri (1988) de mevcuttur. Tüm AAC betonlarının hala iyi performansa sahip olduğu ve aynı bölgede PÇ ile yapılan betonların performansını aştığı görülmüştür. Bu yapılardan alınan örnekler üzerinde yapılan mikroyapı incelemeleri ve performans deneyleri, bu betonların



performanslarının kullanılan hammaddeye, servis koşullarına ve yaşa bağlı olduğunu göstermiştir. Shi, Krivenko ve Roy (2006) “Alkali-Activated Cements and Concretes” adlı kitabında AA-YFC betonlarından üretilen önemli yapılar hakkında aşağıdaki bilgiler verilmiştir.

1986-1994 yılları arasında “Tsentrmetallurgremont” sanayi şirketi AA-YFC betonlarından çeşitli **çok katlı konut inşaatları** yapmıştır. Rusya'nın Lipetsk şehrindeki 16, 20 ve 24 katlı (Şekil 3.9) üç çok katlı bina 2000 yılında incelenmiştir. Bu üç binanın dış duvarları yerinde dökme AA-YFC betondur. Kat döşemeleri, merdivenler ve diğer kısımları ise prefabrike AA-YFC betondur. YFC dozajı  $450 \text{ kg/m}^3$  olup, aktivatör olarak soda çözeltisi kullanılmıştır. Betonların proje dayanımı 25 MPa'dır. 2000 yılında yapılan incelemeler, dayanım açısından proje dayanımının aşıldığını, beton yüzeyinde çatlama ve bozulmanın oluşmadığını göstermiştir.



Şekil 3.9 AA-YFC betonu ile inşa edilmiş 24 katlı bina, Berezinska caddesi 2, Lipetsk, Rusya, 1994 (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

1974 yılında Polonya'nın Krakow şehrinde, duvar panelleri ve kat döşemeleri AA-YFC betonundan imal edilmiş betonarme bir **depo yapısı** imal edilmiştir. Aktivatör olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  kullanılmıştır. YFC dozajı ise  $300 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Prefabrik olarak üretilen elemanlar  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 6 saat süreyle kür edilmiştir. Binanın dış kısmındaki panel elemanlardan alınan karotlar üzerinde yapılan deneyler basınç dayanımının 28. günde  $23 \text{ MPa}$ , 27 yılda ise  $43 \text{ MPa}$  olduğunu göstermiştir. Karbonatlaşma derinliği ise 27 yılda  $11 \text{ mm}$  olarak bulunmuştur. Ana hidratasyon ürünü olarak yoğun C-S-H fazı tespit edilmiştir. Ayrıca,  $\text{CaCO}_3$  ve thomsonite tespit edilmiştir. Mikro çatlak görülmemiş, hamur-agrega ara yüzeyinin çok yoğun olduğu ve donatılarda korozyon oluşmadığı gözlemlenmiştir.

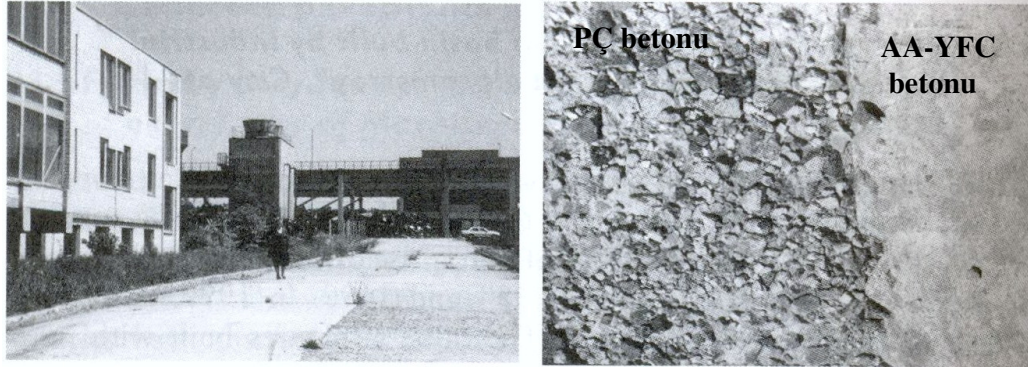
1988 yılında, Rusya'nın St Petersburg ve Moskova şehirleri arasındaki bir kısımda AA-YFC betonundan imal edilmiş **demiryolu traversleri** kullanılmıştır. Aktivatör olarak sodyum metasilikat kullanılmıştır. YFC dozajı  $500 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Dizayn dayanımı  $45 \text{ MPa}$ 'dır. On üç yıl sonra yerinde yapılan incelemeler, bu elemanların iyi durumda olduğunu, çatlak, soyulma vb. kusurlar içermediğini, dayanımının ise  $82 \text{ MPa}$  olduğunu göstermiştir.

Duvarcılık işlerinde kullanılan **blok veya yarı blok elemanlar** gibi AA-YFC'den imal edilmiş ticari ürünlerin üretimi 1960 yılında Ukrayna'da "Azovshelozobeton" şirketine bağlı "Stroydetal" imalathanesinde başlamıştır. Bu blok elemanlar konutlarda, depolarda, bahçe duvarlarında vb. kullanılmıştır.

Rusya'nın Magnitogorsk şehrinde 1984 yılında AA-YFC betonundan iki **yol** yapılmıştır. Bir kısım yol  $60\text{-}80$  ton dingil yükü olan araç trafiğine maruz olup,  $45\text{-}50$  cm kalınlıkta imal edilmiştir. YFC dozajı  $500 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Aktivatör olarak soda-alkali çözültisi kullanılmıştır. Betonlar kamyonlarla taşınarak döküm yerine getirilmiş, vibrasyonla sıkıştırılmış ve doğal iklim koşullarında priz almış ve sertleşmiştir. Dizayn dayanımı  $30 \text{ MPa}$  olup, 16 yıl sonra yapılan incelemede  $86 \text{ MPa}$  basınç dayanımı elde edilmiştir. Donatıda korozyon, çatlama, pullanma ve diğer etkiler gözlenmemiştir. Ternopol şehrinde endüstriyel bir bölgede 1984-1990 yılları arasında AA-YFC betonu ile yollar yapılmıştır. 1999 yılında aynı bölgede ve aynı yıllarda yapılan PÇ betonu ile AA-YFC betonları karşılaştırılmıştır. AA-YFC

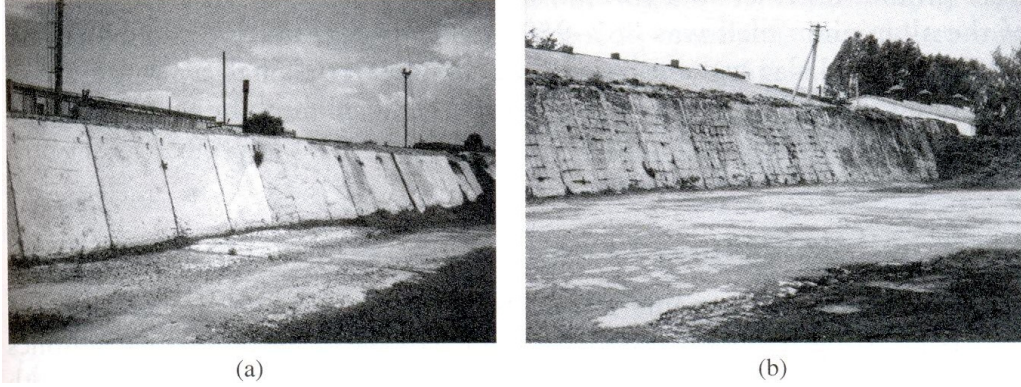
betonları gayet iyi durumdayken, PÇ betonlarının ciddi şekilde hasar gördüğü görülmüştür (Şekil 3.10).

Ukrayna'nın Odessa şehrinde 1965 yılında AA-YFC betonundan deniz sahili şeridinde 33 km uzunluğunda **drenaj kolektörü** imal edilmiştir. Bu yapıların dizaynı ve inşası metro tünellerine benzer olup, karmaşık, pahalı ve teknik olarak imali zor yapılardır. Yaklaşık olarak 40 adet AA-YFC boru prefabrike olarak üretilmiş ve kullanılmıştır. Otuz dört yıl sonra yapılan incelemeler, beton boruların görünümünün iyi durumda olduğunu, görsel olarak korozyon oluşmadığını göstermiştir. Dizayn dayanımı 40 MPa olan betonun, inceleme anında dayanımının 62 MPa olduğu görülmüştür.



Şekil 3.10 Endüstriyel bir bölgede AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş yollar, Ternopol, 1984 (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Ukrayna'da çiftçilerin kullandıkları **yem depolarının** inşasında, 1982 yılında AA-YFC betonları kullanılmıştır. Betonarme panel elemanlardan oluşan bir yapıda 2000 ton AA-YFC betonu kullanılmıştır. Aktivatör olarak, soda - potasyum çözeltisi kullanılmıştır. Dizayn dayanımı 30 MPa olan yapıdan 18 yıl sonra alınan numuneler üzerinde yapılan deneyler dayanım değerinin 39 MPa olduğunu göstermiştir. Yemlerin fermantasyonu kuvvetli organik asitlerin oluşumuna neden olarak betonun bozulmasına yol açmaktadır. Aynı zamanda, araç trafiği panel elemanlar üzerinde dinamik yüklere neden olmaktadır. AA-YFC betonlarından üretilen panellerde 18 yıl sonra herhangi bir bozulma oluşmazken, PÇ betonlarıyla üretilen panellerde betonda bozulma ve donatıda paslanma oluşmuştur (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Yem deposu yapımında kullanılan donatılı AA-YFC ve PÇ betonu ile üretilmiş paneller, Oblast, Ukrayna, 1982 (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

1978 yılında Rusya'nın Berezovo şehrinde **otoklavla üretilmiş gözenekli** AA-YFC betonlarından yapı malzemeleri üretilerek satışa sunulmuştur. Aktivatör olarak soda üretim atıkları kullanılmıştır. Yoğunluğu 300 ile 1200 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen ve dayanımı 36 MPa değerine ulaşan betonlar üretilmiştir.

1981-1983 yılları arasında AA-YFC bağlayıcıları ve kaolin lifleri kullanılarak **refrakter** özellikle AA-YFC betonları üretilmiştir. YFC, öğütülmüş serpantin kayası ve kaolin lifleri birlikte öğütülmüş ve %10 sodyum metasilikat çözeltisi ile aktive edilmiştir. Sıcaklığın 867-950 °C arasında olduğu servis koşullarında, AA-YFC betonları 9 ay, alüminli çimento ile üretilen betonlar ise 1 ay servis ömrü sunabilmiştir.

AA bağlayıcılar **petrol kuyusu çimentosu** olarak, Kırgızistan ve Tacikistan'da kullanılmıştır. AAH'lar YFC, soda külü ve kumdan oluşmuştur. Bir günlük basınç dayanımı 11-18,5 MPa arasında değişmektedir.

Bu betonların üretim prosesi geleneksel Portland çimentosu betonlarıyla oldukça benzerdir. Kullanılan aktivatör karışım suyu ile birlikte ilave edilebilir. Üretiminde geleneksel Portland çimentoları ile üretilen betonların üretiminde kullanılan araç ve gereçlerin kullanılabilmesi bu betonların ülkemizde henüz üretimi yapılmamıştır.

## BÖLÜM DÖRT

### ALKALİ AKTİVASYON YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN BAĞLAYICILARIN DIŞ ETKİLERE DAYANIKLILIĞI

Portland çimentoları ile dünyanın kabuğunu oluşturan ana kayanın mineral bileşimi farklıdır. Portland çimentosunun ana hidratasyon ürünü C-S-H ve  $\text{Ca(OH)}_2$  iken, ana kaya alkaliler içeren zeolitik malzemelerdir. Alkalilerle aktive edilmiş harç ve betonların dayanıklılığının nedeni zeolitik malzemelerin oluşumu olabilir (Roy, 1999).

Langton ve Roy (1984) tarafından eski bağlayıcılar üzerinde yapılan çalışmalarda, puzolanik Roma çimentosu harç ve betonlarında analsim tespit edilmiştir. Çeşitli antik çimentolarda zeolitin varlığı, ana fazların zeolit benzeri malzemelere uzun dönemli dönüşümünün son kalıcı ürününün zeolit olduğunu göstermiştir.

İtalya, Yunanistan, Kıbrıs ve Mısır'daki tarihi yapıların durabilitesi üzerine yapılan incelemeler, modern betonla tamir edildiğinde antik harç ve betonların aşırı korozif koşullardan etkilenmediğini, ancak tamiratta kullanılan tamir harç ve betonlarının ise sadece 10 yıl civarında harap olduğu görülmüştür (Roy, 1999).

Çeşitli olumsuz dış etkilere karşı AA-YFC harç ve betonlarının dayanıklılığı aşağıda özetlenmiştir:

#### 4.1 Sülfat Etkisi

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2002) sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC betonlarının sodyum ve magnezyum sülfat etkilerine dayanıklılığını incelemiştir. On iki ay süreyle %5  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisine maruz kalan AA-YFC betonlarında görsel açıdan bir bozulma gözlenmezken, %5  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde numune köşelerinde bazı çatlamlar başlamıştır. Bununla birlikte, PÇ betonları  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde genleşme ve çatlama,  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde ise genleşme, çatlama ve köşelerde kütle kaybı göstermiştir. PÇ betonundaki dayanım kaybı AA-YFC'den daha fazla olmuştur.

Ayrıca,  $MgSO_4$  çözeltisindeki dayanım kaybı  $Na_2SO_4$  çözeltisindekinden daha fazla olmuştur. XRD analizleri,  $Na_2SO_4$  çözeltisine maruz kalan numunelerde alçı taşı ve etrenjit oluşmadığını,  $MgSO_4$  çözeltisinde ise önemli miktarda alçı taşı oluştuğunu göstermiştir. Bu arada, PÇ betonu  $Na_2SO_4$  çözeltisine maruz bırakıldığında etrenjit,  $MgSO_4$  çözeltisine maruz bırakıldığında ise önemli miktarda etrenjit ve alçı taşı oluşmuştur.  $MgSO_4$  etkisinde C-S-H'in dekalsifikasyonu ve bozulması aşamasında, AA-YFC ve PÇ'nin yüzey katmanlarında alçı taşının çökeldiği görülmüştür. C-S-H'in dekalsifikasyonu hamurun bağlayıcılık özelliğini yok ederek betonun yumuşamasına yol açar. Bir başka deyiş ile, PÇ betonlarında etrenjit ve alçı taşı oluşumu önemli iken, AA-YFC betonlarında sülfat etkisi nedeniyle bozulma alçı taşının çökmesinden kaynaklanmaktadır. Sülfat etkisine dayanıklılıkta kimyasal kompozisyon ve hamurun geçirimliliği en önemli parametrelerdir. PÇ hamurları yapısında ihtiva ettikleri kalsiyum hidroksitten dolayı AA-YFC'ye kıyasla ilave kalsiyuma sahiptir. Bu ilave Ca, C-S-H'in sülfat etkisi altında dekalsifikasyonunu azaltır. PÇ'ye kıyasla AA-YFC hamurları hemen hemen hiç kalsiyum hidroksite sahip değildir. Bununla birlikte, AA-YFC hamurları PÇ hamurlarına kıyasla daha küçük boyutlu boşluklara sahiptir. Sonuç olarak, AA-YFC hamurlarının geçirimliliği PÇ hamurlarına kıyasla daha düşüktür ve zararlı iyonların girişine karşı AA-YFC'yi korur. Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2002) tarafından  $Ca(OH)_2$  varlığının sülfat saldırılarına karşı dayanıklılığını arttırdığı belirtilse de, bu açıklama mevcut literatüre terstir. Neville (1995), sülfat etkilerine karşı dayanıklılığı arttırmak için, genleşen etrenjit oluşturması nedeniyle  $Ca(OH)_2$  miktarının sınırlandırılması gerektiğini bildirmiştir.

Bakharev (2005b) geopolimerlerin sülfat etkisine karşı dayanıklılığını incelemiştir. F tipi UK, sodyum hidroksit (8FA), sodyum hidroksit - potasyum hidroksit karışımı (8FAK) ve sodyum silikat (8FASS) ile aktive edilmiştir. Hamur örnekleri %5 sodyum sülfat, %5 magnezyum sülfat ve %5 sodyum sülfat+%5magnezyum sülfat çözeltisinde bekletilmiştir. Kıyaslama açısından, PÇ ve %80 PÇ+%20 UK (UKPÇ) hamurları da hazırlanmıştır. Geopolimer örneklerinin yüzeyinde 5 ay sonunda herhangi bir görsel değişiklik oluşmazken, PÇ hamurlarında 1 mm'ye varan kalınlıkta beyaz bir tabaka oluşmuştur. Sülfat etkisine karşı

dayanıklılığın kullanılan aktivatör tipine önemli derecede bağlı olduğu görülmüştür. 8FA karışımının sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerine dayanıklılığının 8FASS ve 8FAK karışımlarından daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum 8FA örneklerinin daha stabil çapraz bağlı polimer yapısına ve ortalama boşluk çapının daha düşük olmasına bağlanmıştır. Hamurların stabilitesi sülfat ortamındaki kationun tipine bağlıdır. Sodyum sülfat çözeltilerinde, geopolimer hamurlarından çözeltilere alkali transferi gözlenmiştir. Sodyum ve potasyum hidroksit karışımı aktivatörle hazırlanan hamurlarda, alkali iyonlarının çözeltilere difüzyonu önemli gerilmelere ve dikey çatlaklara neden olmuştur. Magnezyum sülfat çözeltilerinde, geopolimerden çözeltilere alkali geçişinin yanında, geopolimerin yüzey katmanına Ca ve Mg difüzyonu olmuştur. Bu durum dayanımın artmasına yol açmıştır. Sodyum silikat kullanılarak hazırlanan da ise etrenjit oluşumu ve dayanım kaybı ortaya çıkmıştır. Geopolimerler arasında en fazla dayanım kaybeden karışım genellikle 8FASS karışımı olmuştur.

#### 4.2 Asit Etkisi

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2003) AA-YFC betonlarının asit etkisine karşı dayanıklılığını incelemiştir. Hazırlanan beton karışımları ve numune boyutları "Sülfat Etkisi" bölümündeki ile aynıdır. Beton örnekleri pH'ı 4 olan asetik asit çözeltilerine maruz bırakılmıştır. İki ay sonunda, AA-YFC örneklerinin görünümünde bir değişim olmamış, kütlelerinde ise çok küçük bir artış olmuştur. Bununla birlikte, PÇ örneklerinin yüzeyinde yumuşak beyaz kalıntılar ve kütle kaybı oluşmuştur. PÇ örnekleri 12 ay sonunda %47, AA-YFC örnekleri ise %33 dayanım kaybetmiştir. PÇ örneklerinde pH'ın 9'un altına düştüğü derinlik AA-YFC örneklerinden daha fazla bulunmuştur. Bir başka deyişle, AA-YFC betonu asit çözeltilerine maruz kaldığında PÇ betonundan daha iyi davranmıştır. SEM (BSE) analizleri, beton yüzeyinden 5 mm derinliğe kadar, hamur ve agrega kaybı ve çözümler olduğunu göstermiştir. EDS analizi, C-S-H'nin dekalsifikasyonu (Si bakımından zengin, Ca tüketilmiş) nedeniyle bozulmayı doğrulamıştır. XRD analizi ise, hasar görmemiş bölge ile aynı çıkmıştır. Bozulma ürünleri yüksek çözünürlüklerinden veya matristeki miktarlarının yetersiz olmasından ötürü tespit edilememiş olabilirler. Asit çözeltilerine maruz kaldığında AA-YFC betonunun iyi performansı, PÇ hamurlarına kıyasla cüruf

hamurlarının daha düşük Ca içeriğine bağlanmıştır. AA-YFC hamurlarındaki cüruf partikülleri ve düşük Ca içeriğine sahip C-S-H (ortalama Ca/Si oranı 1) asit çözeltisinde PÇ hamuru bileşenlerine kıyasla daha kararlıdır.

Glukhovsky (1981) AA-YFC harçlarının pH'ı 3 olan hidroklorik asit ve laktik asit çözeltilerinde eğilme dayanımı kazanmaya devam ettiğini göstermiştir. Jiang, Silsbee, Breval ve Roy (1997) 6 ay süreyle %5 asit çözeltisine maruz kalan harç numuneleri üzerinde yaptığı deneylerde sitrik asit çözeltisinde sadece çok küçük değişiklikler gözlemlerken, hidroklorik ve nitrik asit çözeltilerinde orta derecede değişiklikler, sülfürik asit çözeltisinde ise şiddetli bozulma tespit edilmiştir.

Shi ve Stegemann (2000) sodyum metasilikat ile aktive edilmiş YFC hamurlarını pH'ı 3 olan nitrik asit, pH'ı 3 ve 5 olan asetik asit çözeltilerine maruz bırakmıştır. Sabit bir pH'da, asetik asidin nitrik asitten daha korozif olduğu görülmüştür. AA-YFC hamurlarının bozulma derinliği PÇ hamurlarına kıyasla daha düşük mertebede kalmıştır. PÇ ve AA-YFC hamurlarının bozulma sonrasında çoğunlukla,  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  jeli içeren bir koruyucu katman oluşturarak bozulmanın daha fazla ilerlemesini önlediği düşünülmüştür. Hamurların asit etkisine dayanıklılığının, hamurların porozitesinden çok koruyucu katmana ve hidrasyon ürünlerinin yapısına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Asit çözeltisinin pH değerindeki azalmaya, kalsiyum silisten daha hassas olup, en az hassas olan alüminyumdur.

Bakharev (2005a) F tipi UK ile üretilen geopolimerlerin asit etkisine karşı dayanıklılığını incelemiştir. Hazırlanan hamur örnekleri (bk. sülfat etkisi bölümü) %5 asetik asit (pH=2,4) ve %5 sülfürik asit (pH=0,8) çözeltilerine maruz bırakılmıştır. Asit çözeltilerinin tipi ve konsantrasyonu, betonun kanalizasyon boruları, madencilik ve gıda üretim tesislerinde maruz kaldığı pratik koşullara göre seçilmiştir. AA karışımlar PÇ karışımına kıyasla daha üstün performans göstermiştir. Geopolimer hamurlarda 5 ay asetik aside maruz kalma durumunda görsel olarak çok az bir değişim görülürken, sülfürik asit yüzeyde yumuşama ve önemsiz renk açılmalarına neden olmuştur. PÇ hamurlarında ise görsel açıdan önemli değişiklikler oluşmuştur. Asetik asit etkisi altında, en iyi performans 8FAK karışımından elde



edilmiştir. Bunu, 8FA ve 8FASS örnekleri izlemiştir. PÇ ise çok kötü performans sergilemiştir. Sülfürik asit etkisinde en iyi performans 8FA karışımından (6 ayda %17,5 kayıp) elde edilmiştir. 8FASS ve 8FAK 6 ay sonunda %80'in üzerinde dayanım kaybetmiştir. PÇ hamurları 1. ayın sonunda tamamen parçalanmış, UK katkılı PÇ ise %77 dayanım kaybına uğramıştır. SEM ve XRD analizleri, asidik çözeltiliye maruz kalma sonucunda geopolimerlerde amorf polimer veya zeolit çökeldiğini göstermiştir. 8FA geopolimerinin iyi performansı stabil çapraz bağlı alüminosilikat yapısına ve boşluklarının nanometre boyutunda küçük olmasına bağlanmıştır. Alüminosilikat jelin yüzeyindeki merkezler, onun asidik ortamla reaksiyonunu etkiler. Potasyum iyonu aktif alanlar yaratarak 8FAK geopolimerinin sülfürik asitte hızlı bozulmasına neden olmuştur. 8FAK asetik asitte amorf polimerler üreterek iyi durabilite sağlarken, sülfürik asitte Na-P1 zeolitinin çökmesi ile dayanım kaybı meydana gelmiştir. Kimyasal yapı yanında morfoloji de asit etkisine dayanıklılıkta önemli rol oynamaktadır. 8FA kötü kristalize olmuş düzenli bir yapıya sahipken, 8FASS sadece amorf fazları içermektedir. Bir başka deyişle, polimerin kimyasal stabilitesi bir veya daha fazla fazın içsel düzeni olduğunda gelişmektedir. Asidik ortamda geopolimer malzemenin bozulması, alüminosilikat polimerin depolimerizasyonu ve silisik asidin salıverilmesi, hidrojen ve hidronium iyonlarıyla Na ve K kationlarının yer değiştirmesi ve geopolimer yapının alüminyumunu kaybetmesi ile ilgilidir. Aynı zamanda, silisli polimer ve zeolit yoğunlaşmasıyla da ilgilidir. Asidik ortamda yüksek performanslı geopolimer malzemeler amorf polimer matris içinde yarıkların oluşumuyla, düşük performanslı geopolimerler ise, zeolit kristalizasyonu ve kırılabilir yapı oluşumuyla zarar görmüştür. Agresif ortamlarda geopolimer malzemelerin stabilitesi alüminosilikat jeli içerisindeki içsel düzene bağlıdır. Sodyum hidroksit ile hazırlanan daha kristalin geopolimerik malzemeler asit etkisine, sodyum silikat aktivatörü ile hazırlanan amorf geopolimerlerden daha dayanıklıdır. Kimyasal olarak stabil olmama, K iyonlarının varlığında artan alüminosilikat jel yüzeyi üzerindeki aktif bölgelerin varlığına bağlıdır.

Palomo, Blanco-Varela, Granizo, Puertas, Vazquez ve Grutzeck (1999) cam suyu ile aktive edilmiş metakaolin harçlarının 270 güne kadar asit, sülfat ve deniz suyu

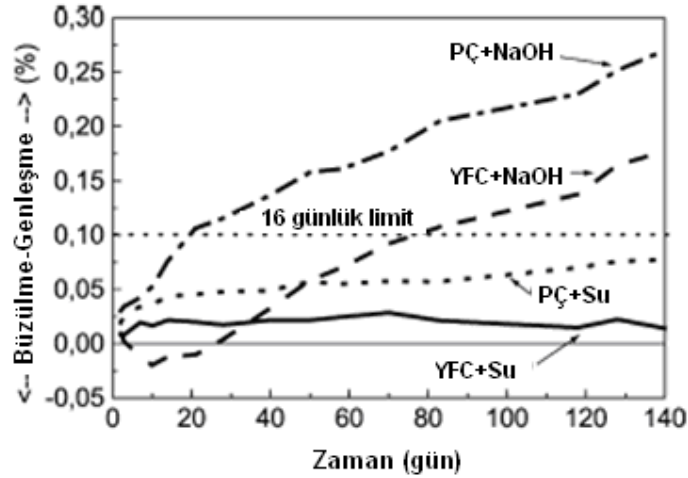
etkilerine dayanıklılığı incelenmiştir. En fazla dayanım kaybı yaratan asit etkisi olmuştur.

### 4.3 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

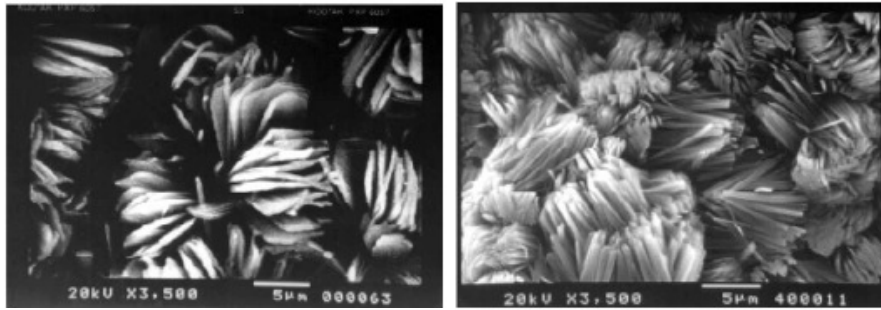
PÇ harç ve betonlarında, ASR uygun nem koşulları altında potansiyel olarak reaktif agregalarla çimentoda mevcut alkaliler ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) arasında meydana gelmektedir. Bazı araştırmacılar ASR'nin sadece boşluk çözeltisindeki alkalilerle reaktif agrega arasındaki bir reaksiyon olmadığını, reaksiyonun oluşabilmesi için ortamda yeterli miktarda  $\text{Ca}^{+2}$  iyonlarının da (PÇ hamurundaki portlandit tarafından sağlanmaktadır) bulunması gerektiğine işaret etmiştir. PÇ betonlarında YFC varlığı -cürufun çimentodaki alkalileri bağlayabilme ve portlandit miktarını azaltabilme yeteneğinden ötürü- ASR'nin zararlı etkilerini en aza indirir veya yavaşlatır. AA-YFC bağlayıcılarının portlandit içermeme özellikleri bu bakımdan pozitif etki yaparken, yüksek oranda alkali içermesi ASR'ye yol açabilir. Çoğu durumda alkali içeriği %3'ün üzerindedir. PÇ genellikle %0,8'den daha az alkali içerir. Bazı araştırmacılar AA-YFC harçlarında ASR'nin meydana gelmesinin, alkalilerin tamamının veya tamamına yakınının (%80'den daha fazla) farklı hidratasyon ürünleri tarafından bağlanması nedeniyle mümkün olmadığına işaret etmektedirler. Diğer bazı araştırmacılar ise reaktif agregalı sistemlerde genişlemenin meydana geleceğini belirtmişlerdir (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2002).

Fernandez-Jimenez ve Puertas (2002) reaktif silis içeren opal agregalı, NaOH ile aktive edilmiş YFC harçlarının ASTM C 1260-94 standardına göre ASR dayanıklılığını incelemiştir. 1 M NaOH (80 °C) çözeltisinde bekletilmiş AA-YFC harçları genişmeden önce başlangıçta büzülmüştür. Saf suda bekletildiğinde ise sadece başlangıçta az bir miktar genişmiştir. Çimento harçları hem saf suda hem de 1 M NaOH çözeltisinde AA-YFC harçlarından daha fazla genişmiştir (Şekil 4.1). Bunun ana nedeni, YFC ve agregalar arasındaki alkalilerle ve az miktardaki  $\text{Ca}^{+2}$  iyonlarıyla reaksiyon yapmak için yaşanan çekişmedir. Bu durumda, AA-YFC harçlarının ana ürünü düşük Al ve Na içerikli C-S-H'tır (C/S=0,82, A/S=0,16 ve N/S=0,11). Reaksiyon hızı arttığında ikinci reaksiyon ürünü (C/S=0,18-0,21 ve N/S=0,59-0,25 aralığında olan çubuk ve rozet tip morfolojiye sahip sodyum ve

kalsiyum hidrate jel-Şekil 4.2a) genişleme yaratır. PÇ harçlarında ise boşluklarda ASR'nin ilerleyen aşamalarında kılıç tipi morfolojiye sahip kristaller (C/S=0,18 ve N/S=0,23-Şekil 4.2b) tespit edilmiştir.



Şekil 4.1 Genleşme eğrileri (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2002).

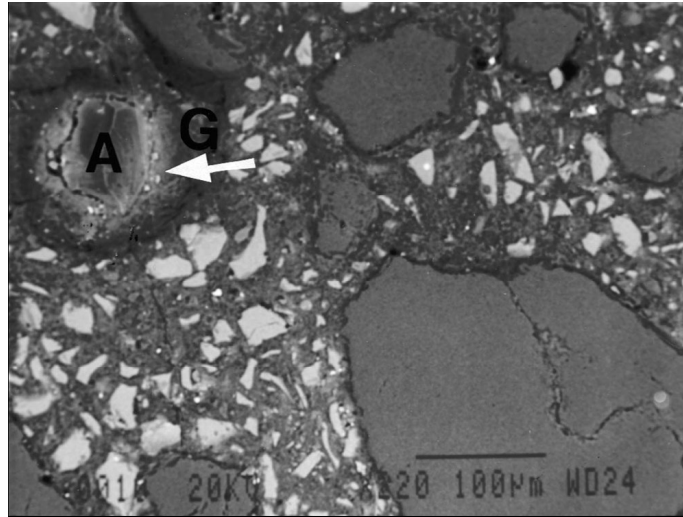


Şekil 4.2 1 M NaOH çözeltisinde 80 °C'de 140 gün bekletilen a) AA-YFC harçları boşluklardaki rozet tip reaksiyon ürünleri b) PÇ harçları kılıç tipi reaksiyon ürünleri (Fernandez-Jimenez ve Puertas, 2002).

Garcia-Lodeiro, Palomo ve Fernandez-Jimenez (2007), ASTM C 1260-94 standardına göre, 8 M NaOH ile aktive edilmiş F sınıfı UK ile üretilen harçların ASR genleşmelerini incelemiştir. AA-UK harçlarının ASR genleşmelerinin PÇ harçlarına kıyasla önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür. SEM incelemeleri AA-UK örneklerinde matris boşluklarında zeolitik kristal ürünlerinin oluştuğunu göstermiştir. Zeolitik yapılar matriste mevcut boşluklar içerisine çökeldiğinden, gerilme yaratmazlar ve çatlak oluşumuna yol açmazlar. Bu ürünler “yalancı rozet”

morfolojisinde olup, genişlemenin AA-UK örneklerinde neden az olduğunu açıklar. Oluşan yapıların kalsiyum içeriği PÇ harçlarındakine kıyasla çok düşüktür. XRD analizleri agregadaki kuvarsın çözüldüğünü göstermiştir. Ancak, bu sistemlerde kalsiyum olmadığından, ASR ürünleri geliştirici değildir.

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2001b) AA-YFC betonlarının ASTM C 1293-95 standardına göre ASR dayanıklılığını incelemiştir. Hazırlanan beton karışımları ve numune boyutları “Sülfat Etkisi” bölümündeki ile aynıdır. Reaktif olmayan kum ve reaktif iri agregaya kullanılmıştır. Kıyaslama amacıyla deneyler reaktif olmayan agregaya için de tekrarlanmıştır. PÇ örneklerinde görsel bir hasar oluşmazken, AA-YFC örneklerinde harita çatlakları oluşmuştur. AA-YFC betonları 12 ay sonunda standartta verilen genişleme limitini (%0,04) aşmıştır. Bununla birlikte, PÇ betonun genişmesi 22 ay sonunda %0,03 değerine ulaşamamış olup, limit değerinin altında kalmıştır. AA-YFC betonlarının yüksek genişmesi sistemin yüksek alkali içeriğine bağlanmıştır. SEM incelemeleri, bazı agregaların çevresinde silika jelinin (Şekil 4.3 ok ile işaretli bölge) oluştuğunu göstermiştir. Jelin toplandığı bölgelerde sadece birkaç mikro çatlak oluşmuştur. EDS analizi Si, O ve küçük miktarda Ca, Na, Mg ve Al elementlerinin var olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.3 Reaktif agregaya ile üretilmiş AA-YFC betonlarının iç kısmının 10 ay sonra SEM (BSE) görüntüsü, A: Reaktif agregaya, G: alkali-silika jeli (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 2001b).

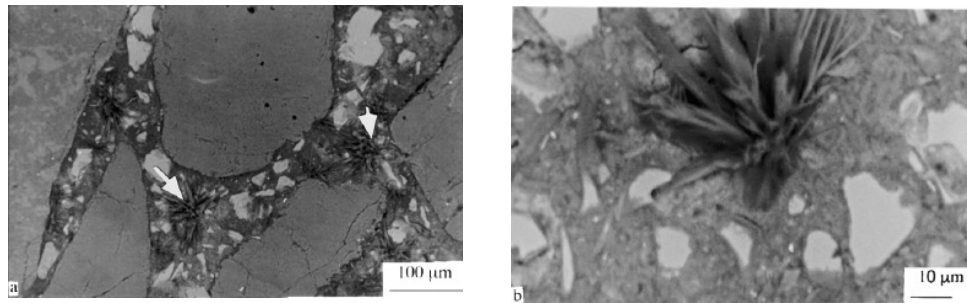
Metso (1982), aynı seviyede alkali içeren iki AA-YFC'nin ASR hassasiyetinin çok farklı olduğunu göstermiştir. AA-YFC betonlarında dayanım alkali aktivatör içeriğinin artmasıyla (yaklaşık %8 Na<sub>2</sub>O içeriğine kadar) artar. Bununla birlikte, Na içeriğinin artması ASR olasılığını artırır. Bu nedenle reaktif agrega içeren AA-YFC betonlarının durabilitesi bu iki parametreye bağlıdır. Bazı durumlarda, beton yüksek dayanımından ve agreganın düşük reaktivitesinden ötürü zarar görmeyebilir.

#### 4.4 Karbonatlaşma

Byfors, Lehtonene, Pyy ve Romben (1989) AA-YFC betonlarının düşük alkalitesi ve deney esnasında çatlaması nedeniyle, PÇ betonlarına kıyasla daha hızlı karbonatlaştıklarını bildirmiştir. Kuruma nedeniyle AA-YFC betonlarında oluşan çatlaklar özellikle düşük bağıl nemlerde karbonatlaşmanın hızlanmasına neden olur. Bununla birlikte, Ionescu ve Ispas (1986) sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC/UK bağlayıcısının karbonatlaşmasının PÇ betonu ile benzer olduğunu, Xu ve Pu (1999) AA-YFC betonunun karbonatlaşma hızının PÇ betonundan daha yavaş olduğunu bildirmiştir.

Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2001a) AA-YFC betonlarının karbonatlaşmaya karşı dayanıklılığını incelemiştir. Hazırlanan beton karışımları ve numune boyutları "Sülfat Etkisi" bölümündeki ile aynıdır. Numuneler 0,352 M NaHCO<sub>3</sub> çözeltisine (karbonatlaşmış su) ve yüksek derecede karbondioksit içeren atmosfere (%10-20 CO<sub>2</sub>-%70 bağıl nem) maruz bırakılmıştır. Karbonatlaşma etkisine maruz kalan AA-YFC ve PÇ betonlarında görsel bir bozulma oluşmazken, dayanımda azalma oluşmuştur. Dayanım kaybı ve karbonatlaşma derinliği AA-YFC betonlarında PÇ betonlarına kıyasla daha fazla bulunmuştur. Karbonatlaşmış çözeltide AA-YFC betonlarının yüzey katmanında yumuşama, hamur ve agrega kaybı gözlenmiştir. SEM analizleri, C-S-H'nin dekalsifike olduğunu ve YFC hamuru ile çözeltideki karbonat iyonları arasındaki karbonatlaşma reaksiyonu sonucunda kalsiyum karbonat çökeltilerini göstermiştir. Dekalsifike C-S-H ve alüminosilikat jeli betonun yumuşamasına ve dayanımda azalmaya neden olmuştur. Atmosfer koşullarında karbonatlaşma halinde ise, AA-YFC betonlarının hamurunda Ca, Si, O, C ve az miktarda Al, Mg, Na elementlerinden oluşan bazı yeni kristaller ortaya

çıkıştır (Şekil 4.4). Bu yeni kristaller C-S-H'dan oluşmuştur ve hamurda önemli bir hacim işgal eder. XRD analizinde kalsit tespit edilmiştir. Her iki karbonatlaşma deneyinde de AA-YFC betonunun boşluk çözeltisinin pH'ı PÇ betonundan daha hızlı azalmıştır. Beton numuneleri çözeltiliye daldırıldığında, Na yüksek çözünürlükte olduğundan ve kademeli olarak AA-YFC matrisinden ayrıldığından sadece C-S-H'tan gelen Ca boşluk çözeltisindeki pH'ı sağlar. Bununla birlikte, AA-YFC betonunun C-S-H'ındaki kalsiyum silis oranı yaklaşık 1 iken, PÇ betonunda bu oran 1,7-2'dir. Bu nedenle, AA-YFC betonu boşluk çözeltisinin pH'ını sağlamada düşük kapasiteye sahiptir.



Şekil 4.4 CO<sub>2</sub> bakımından zengin atmosfere maruz AA-YFC betonlarının SEM (BSE) görüntüsü a) Ok işaretli bölge karbonatlaşmış AA-YFC'de oluşmuş yeni kristaller b) karbonatlaşmış AA-YFC'de büyümüş yeni kristaller (Bakharev, Sanjayan ve Cheng, 2001a).

AA-YFC betonu CO<sub>2</sub>'e maruz bırakıldığında C-S-H ile reaksiyonundan kalsiyum karbonat, dekalsifike C-S-H ve alüminosilikat jeli oluşur. AA-YFC betonunun Ca içeriğinin düşüklüğünden dolayı, CaCO<sub>3</sub> kalıntıları çok azdır. Karbonatlaşma reaksiyonu sonucunda, matrisin porozitesi artabilir. Bu betonun difüzyonunu ve HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ve CO<sub>2</sub> girişini artırır. Bu yüzden reaksiyon cephesi içeriye doğru daha hızlı ilerler. Bu nedenle AA-YFC betonu karbonatlaşmaya karşı daha hassastır.

#### 4.5 Klorür Difüzyonu

Patentli bir ürün olan F-Cement'in klorür difüzyon katsayısının benzer su/bağlayıcı oranına sahip PÇ hamuruna kıyasla 30-40 kat daha düşük klorür difüzyon katsayısına sahip olduğu rapor edilmiştir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Shi (2003) AA-YFC ve PÇ harçlarını 28 gün kürden sonra %30 CaCl<sub>2</sub> çözeltisine maruz bırakmıştır. Bozulma derinliğinin PÇ harçlarında AA-YFC harçlarına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. PÇ harcında köşelerde çatlamayı takiben yüzeyde şişme ve pul pul dökülme görülürken, AA-YFC karışımı CaCl<sub>2</sub> etkisine mükemmel dayanıklılık göstermiştir.

Lee ve Deventer (2002), inorganik tuzların alkalilerle aktive edilmiş uçucu kül-kaolin karışımlarının özelliklerine etkisini incelemiştir. Dayanım ve durabilite, klorür tuzlarından olumsuz etkilenmiştir. Bu durum, klorür tuzlarının yapı içerisinde kristal oluşturmaya bağlanmıştır.

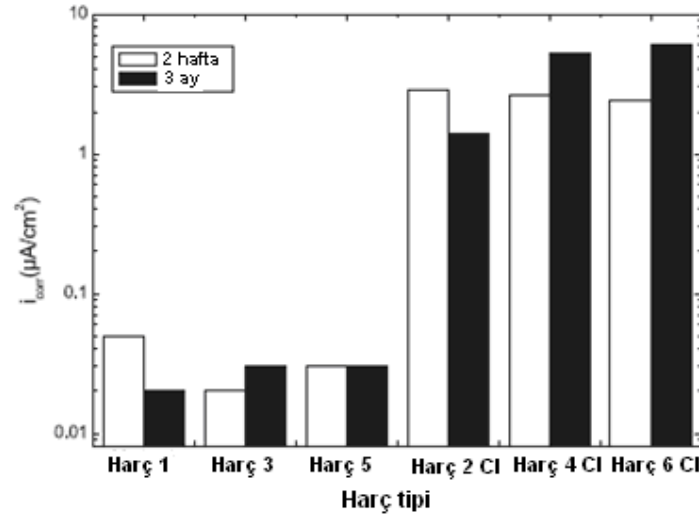
Roy, Jiang ve Silsbee (2000), alkalilerle aktive edilmiş cüruf katkılı Portland çimentosu hamurlarında klorür difüzyon katsayısının artan cüruf oranıyla azaldığını bildirmiştir.

#### 4.6 Donatı Korozyonu

AA-YFC betonlarında çelik donatının korozyonu, cürufun yapısına (asidik, bazik ya da nötr olması), alkalın aktivatörün yapısına ve dozajına ve betonun karbonatlaşmasına bağlı olarak değişmektedir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Miranda, Fernandez-Jimenez, Gonzalez ve Palomo (2005), NaOH (Harç 3-4) ve NaOH+cam suyu (Harç 5-6) ile aktive edilmiş F sınıfı UK harçlarının korozyon dayanıklılığını, çimentolu harçlarla (Harç 1-2) karşılaştırmalı olarak incelemiştir. 2, 4 ve 6 numaralı harçlara bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında Cl<sup>-</sup>, CaCl olarak ilave edilmiştir. Çimentolu harç numunelerinin agrega/çimento oranı 3 iken, aktive edilmiş harçlarda agrega/UK oranı 2'dir. Donatılı prizmatik harç örnekleri hazırlanmıştır. Buhar kürü yapılan numunelerin, korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) ve polarizasyon direnci ( $R_p$ ) belirlenmiştir. Korozyon hızının harç karışımına bağlı olarak değişimi Şekil 4.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, klorür içeren harçların  $i_{corr}$  değerleri daima  $1 \mu A/cm^2$ 'den daha yüksektir. Bununla birlikte, klorür içermeyen harçlar benzer pasivasyon kapasitelerine sahip olup, gömülü çelik elektrotlardan ölçülen değerler

0,1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den daha düşüktür. Sonuç olarak, aktive edilmiş UK harçları PÇ harçları kadar efektif ve hızlı bir şekilde donatı çeliğini pasifize etmiştir. Bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında Cl ilavesi korozyon hızını 100 kat arttırmıştır. Klorür içeren UK harçlarında korozyon hızı çok az daha yüksek bulunmuştur. Bu durum, UK bağlayıcılı harçların bağlayıcı ve dolayısıyla Cl iyonu konsantrasyonunun daha yüksek olmasıyla ilgilidir.



Şekil 4.5 Korozyon hızı ( $i_{\text{corr}}$ ) değerlerinin karşılaştırılması (Miranda, Fernandez-Jimenez, Gonzalez ve Palomo, 2005).

#### 4.7 Aşınma Dayanıklılığı

Pu, Gan, Wu ve Chen (1989) AA-YFC betonlarının aşınma dayanıklılığının geleneksel PÇ betonuna kıyasla daha iyi olduğunu bildirmiştir.

Hu, Wang, Zhang ve Ding (2008) çimento esaslı tamir malzemesi ile geopolimerik tamir malzemelerini (NaOH ve sodyum silikat karışımı ile aktive edilmiş %100 metakaolin ve %80 metakaolin+%20 YFC) eski betona aderans ve aşınma dayanıklılığını bakımından kıyaslamıştır. Metakaolin yerine %20 YFC kullanımı prizi hızlandırmış, dayanımı önemli ölçüde arttırmıştır. Geopolimerik malzemelerin aşınma dayanıklılığının ve eski betona aderansının çimento bazlıya kıyasla daha iyi olduğu görülmüştür. Geopolimerik malzemelerin eski betona daha



iyi aderansı, eski betonun yüzey ürünleriyle alkali aktivatör arasındaki reaksiyon sonucunda daha yoğun bir ara yüzey tabakasının oluşmasına bağlanmıştır.

#### 4.8 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

AA-YFC betonları PÇ betonlarına kıyasla daha iyi donma-çözülme dayanıklılığına sahiptir. Bunun en büyük sebebi, AA-YFC betonlarının boşluk çözeltisinin donma noktasının daha düşük olmasıdır. AA betonlarda boşluk çözeltisinin donma noktası kullanılan aktivatörün yapısından önemli derecede etkilenmektedir. Örneğin, potasyum karbonatla aktive edilmiş karışımda donma noktası  $-36\text{ }^{\circ}\text{C}$  iken, sodyum karbonatla aktive edilende  $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. AA-YFC betonlarının donma noktasının PÇ betonlarına kıyasla daha düşük olmasının diğer nedeni ise boşluk yapılarının farklılığıdır. Daha öncede belirtildiği gibi, AA-YFC hamurları daha fazla jel boşluğuna sahipken, PÇ hamurları daha fazla kapiler boşluğa sahiptir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Kullanılan aktivatör AA-YFC betonlarının donma etkilerine dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sodyum silikat ile aktive edilmiş AA-YFC betonları genellikle en az gözenekli yapıya, en yüksek dayanıma ve en iyi donma-çözülme dayanıklılığına sahiptir. Buhar kürü durumunda önemli olmasa da, oda sıcaklığında kür durumunda YFC'nin bazikliği donma-çözülme dayanıklılığını etkilemektedir. Asidik YFC ile üretilmiş betonlar daha düşük donma dayanıklılığına sahiptir.

Puertas, Amat, Fernandez-Jimenez ve Vazquez (2003) alkalilerle aktive edilmiş YFC ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ ), UK (8 M NaOH) ve %50YFC+%50UK (8 M NaOH) harçlarının donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı üzerinde polipropilen lif kullanımının etkisini incelemiştir. Polipropilen lif katkısı donma-çözülme dayanıklılığına katkıda bulunmamıştır. AA-YFC harçları ve aktive edilmiş UK/YFC harçlarının eğilme ve basınç dayanımı donma-çözülme çevrimleri sonucunda artmıştır. Bu durum, yüksek nem koşulları altında YFC'nin aktivasyonun devam etmesine, büyük miktarda reaksiyon ürünü oluşturması yoluyla dayanımı arttırmasına

bağlanmıştır. AA-YFC betonlarının düşük sıcaklıklara iyi dayanıklılığı alkalin metal çözeltilerinin donma sıcaklığının -15 ile -20 °C'nin altında olması ile bağlantılıdır. Donma-çözülme etkilerine karşı en düşük dayanıklılığı alkalilerle aktive edilmiş UK harçları göstermiştir. PÇ harçları basınç dayanımında kayıp göstermese de, çevrimlerin yarattığı çekme gerilmeleri nedeniyle mikro çatlak oluşumu sonucunda eğilme dayanımında önemli derecede kayıp göstermiştir.

#### 4.9 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

PÇ betonlarının yapısında bulunan  $\text{Ca(OH)}_2$  bu betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığını önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. AA-YFC betonlarda  $\text{Ca(OH)}_2$  yoktur. Bu durum yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı 2 yolla arttırmaktadır:

- PÇ betonlarında 300 °C civarında  $\text{Ca(OH)}_2$  kristalleri çevresinde oluşan çatlakların ortadan kalkması,
- PÇ betonlarında 400-600 °C'de  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in ayrışması ile açığa çıkan  $\text{CaO}$ 'in yeniden hidrate olması %44 hacim artışına, bunun sonucunda da önemli çatlak oluşumlarına ve dayanım kayıplarına neden olur.  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in AA-YFC betonlarında olmaması bu zararlı dönüşümün etkilerini ortadan kaldırır (Aydın, 2004).

Bununla birlikte, AA-YFC betonlarında kapiler porozitenin düşük olması patlayarak parçalanma riskini arttırmaktadır. Bu problem polipropilen liflerin kullanımı ile ortadan kaldırılabilir (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

Bakharev (2006), iki tip F sınıfı UK'yı çeşitli aktivatörlerle aktive ederek hazırladığı geopolimerleri dört saat süreyle 800-1200 °C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakmıştır. UK özelliklerinin ve aktivatör tipinin yüksek sıcaklık davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Düşük S/B oranlarında geopolimerin yüksek sıcaklık performansı artmıştır. Dayanım kayıpları alüminosilikat jelin bozulmasından kaynaklanmıştır. Muhtemelen, geopolimerin tamamlanmamış polimerizasyonundan

ve UK'nın yüksek demir içeriğinden (ergime sıcaklığını düşürür) dolayı Na içeren aktivatör ile aktive edilmiş F sınıfı UK'nın performansı metakaolininkinden önemli derecede düşük bulunmuştur. Basınç altında sıkıştırma (1-10 MPa) pişme esnasında büzülme azaltmıştır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık performansını azaltmıştır. Sonuç olarak, geopolimer malzemeler PÇ betonlarına kıyasla çok daha iyi yüksek sıcaklık performansına sahip olsa da, yüksek büzülme değerlerinden ve basınç dayanımındaki önemli değişiklikten dolayı refrakter olarak kullanılmaya uygun bulunmamıştır. Ancak, Bölüm 3.7'de belirtildiği gibi, bazı AA-kompozisyonları ile üretilen refrakterlerle geleneksel refrakter betonlarına kıyasla daha üstün performans elde edilmiştir. Bu durum, servis ömrünün AA betonlarının kompozisyonu ve maruz kaldığı şartlar tarafından belirlendiğini göstermektedir.

## BÖLÜM BEŞ

### KULLANILAN MALZEMELER ve YÖNTEM

Bu bölüm, deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, deneysel çalışmanın yürütülmesi esnasında uygulanan yöntemler ve her bir deneysel aşamada hazırlanan karışımlara ait bilgileri içermektedir.

#### 5.1 Kullanılan Malzemeler

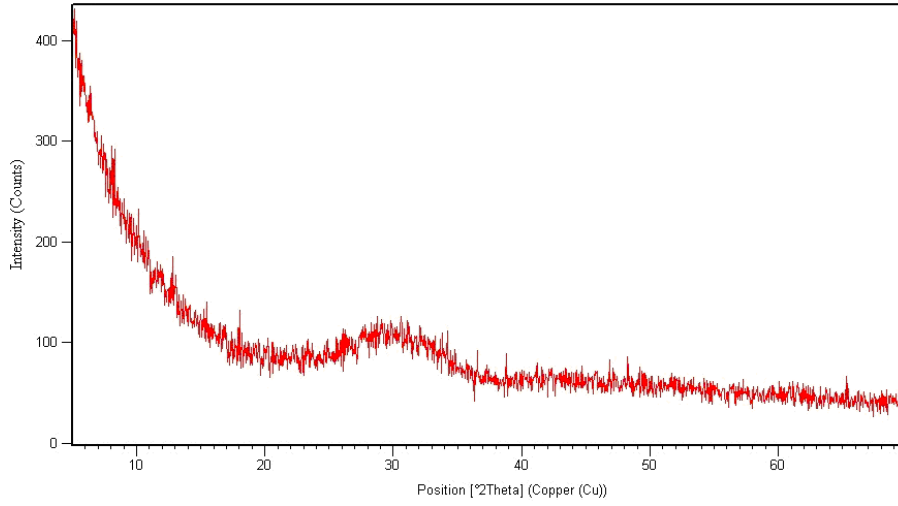
Tez çalışmasının çeşitli aşamalarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin tespit edilen özellikleri aşağıda verilmiştir.

##### 5.1.1 Yüksek Fırın Cürufu (YFC)

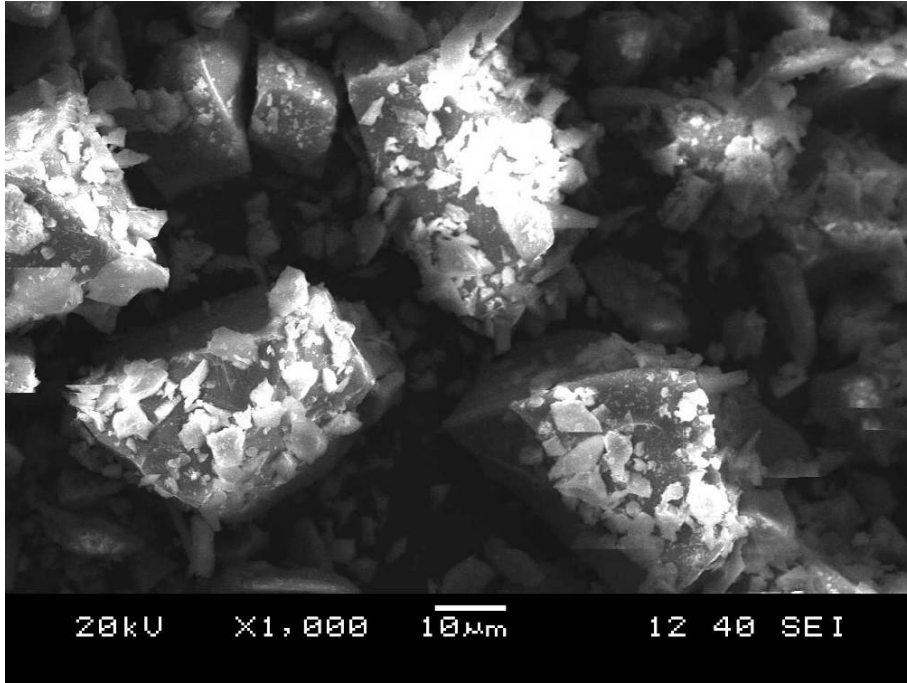
Ereğli demir çelik fabrikasından açığa çıkan cüruf KARÇİMSA firmasından temin edilmiş olup, Blaine inceliği 410 m<sup>2</sup>/kg, 45 µm elekten geçen malzeme miktarı %90, özgül ağırlığı ise 2,88'dir. YFC'nin KARÇİMSA firmasından temin edilen kimyasal analizi Tablo 5.1'de verilmiştir. Hidrolik modül [(CaO+MgO+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/SiO<sub>2</sub>] değeri 1,33'tür. Burada, iyi hidratasyon özelliği açısından cürufun hidrolik modülünün 1,4'ten yüksek olmasının arzu edildiğini belirtmekte fayda vardır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006). Cürufun baziklik indeksi [K<sub>b</sub>=(CaO+MgO)/(SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)] ise 0,81'dir. Tamamı öğütülmüş yüksek fırın cürufu olup, herhangi bir katkı maddesi ihtiva etmemektedir. YFC'nin XRD analizinde pik veren herhangi bir kristale rastlanılmamıştır (Şekil 5.1). Bu durum cürufun tamamıyla amorf olduğunu gösterir. YFC'nin SEM görüntüsü Şekil 5.2'de verilmiştir. Tane şeklinin köşeli olduğu görülmektedir.

Tablo 5.1 Yüksek fırın cürufunun kimyasal analizi

Bileşen	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	S	K. Kaybı
%	40,20	1,68	11,66	35,90	5,88	0,30	1,47	0,90	0,88



Şekil 5.1 Yüksek fırın cürufunun XRD analizi.



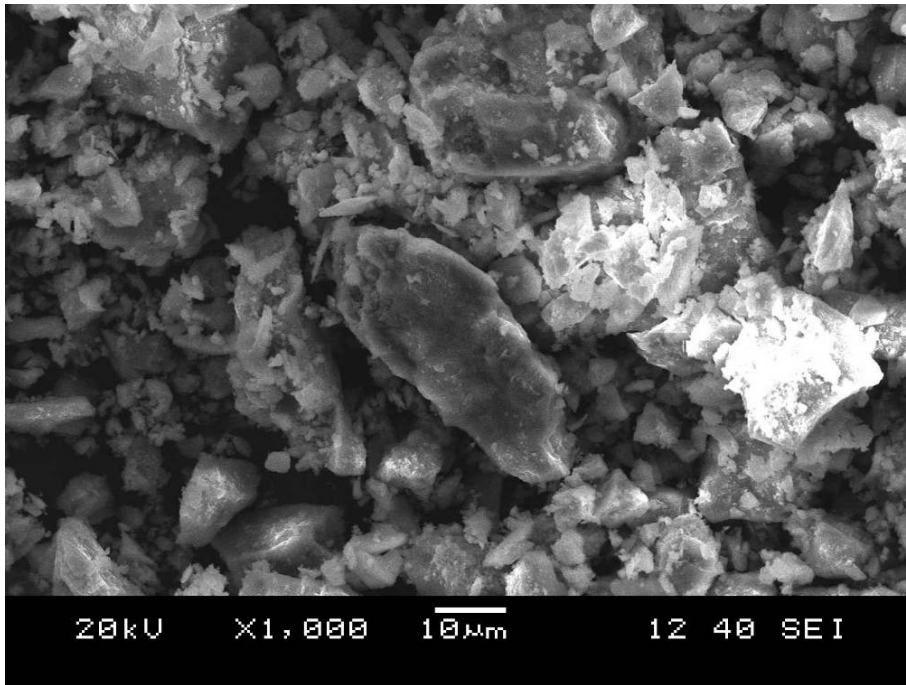
Şekil 5.2 Yüksek fırın cürufunun SEM (SE) görüntüsü.

### 5.1.2 Çimento (PÇ)

Kullanılan çimento Denizli Çimento Fabrikasından temin edilmiş olup, CEM I 42.5R sınıfındadır. Çimentonun üretici firmadan temin edilen fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.2’de, SEM görüntüsü ise Şekil 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.2 Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
SiO <sub>2</sub>	19,1	Özgül yüzey (Blaine) (m <sup>2</sup> /kg)	369
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,40	Priz başlangıcı (dak)	110
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	Priz sona ermesi (dak)	166
CaO	61,85	Hacim Genleşmesi (mm)	1,00
MgO	2,05		
Na <sub>2</sub> O	0,27		
K <sub>2</sub> O	0,70		
SO <sub>3</sub>	3,72		
Cl	0,0004		
Kızdırma kaybı	1,82		
		Basınç dayanımı	
		2 günlük (MPa)	27,1
		7 günlük (MPa)	43,3
		28 günlük (MPa)	56,0



Şekil 5.3 Çimentonun SEM (SE) görüntüsü.

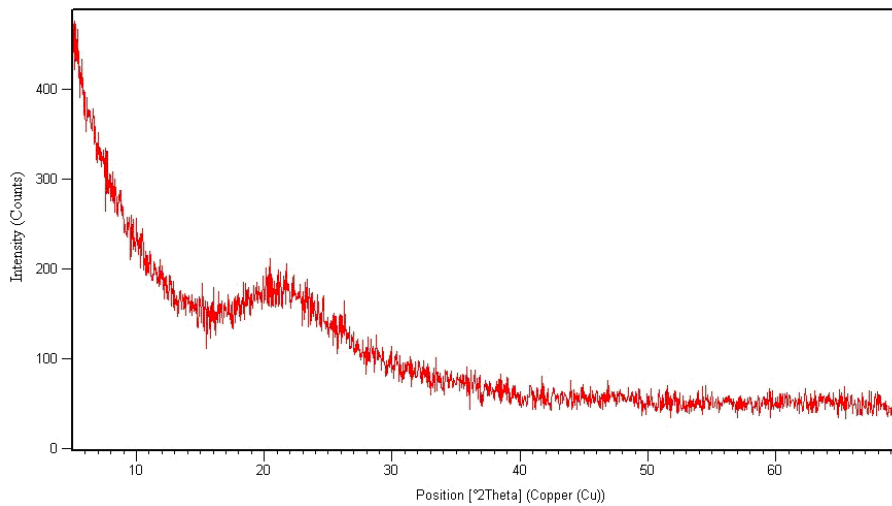
### 5.1.3 Mineral Katkılar

Çalışma kapsamında kullanılan diğer malzemelerin (F ve C sınıfı 2 tip uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), metakaolin (MK)) üretici firmalarından temin edilen kimyasal analizleri ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

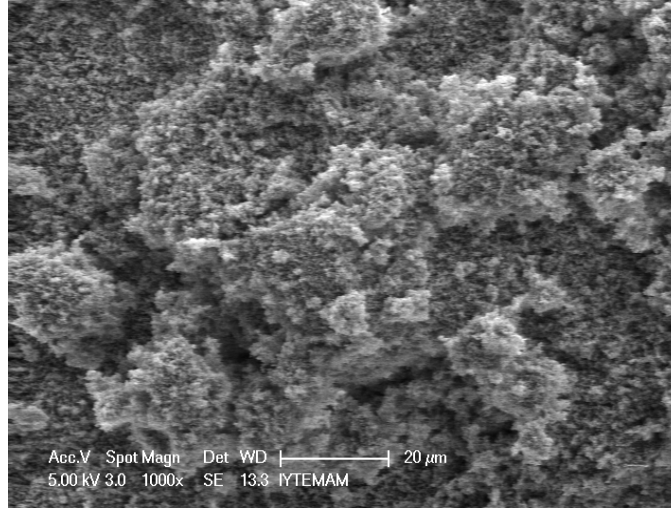
Tablo 5.3 Çalışma kapsamında kullanılan diğer malzemelerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

	F sınıfı UK	C sınıfı UK	Silis dumanı	Metakaolin
SiO <sub>2</sub>	51,31	41,74	96,10	52,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,92	19,23	--	42,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,50	4,94	--	0,34
CaO	6,09	23,47	--	0,3
MgO	2,63	1,74	--	0,26
K <sub>2</sub> O	3,21	1,16	--	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,43	0,37	--	0,1
SO <sub>3</sub>	1,72	3,45	--	--
TiO <sub>2</sub>	--	--	--	0,72
MnO	--	--	--	0,01
Kızdırma kaybı	2,40	1,31	1,81	--
Serbest CaO	0,54	4,23	--	--
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	2,20	2,32	2,20	2,60
Özgül yüzey, m <sup>2</sup> /kg	323 (Blaine)	251 (Blaine)	23360 (BET)	

F sınıfı uçucu kül Çatalağzı, C sınıfı uçucu kül ise Soma termik santralinden temin edilmiştir. Metakaolin ticari olarak pazarlanan bir ürün olup BASF firmalarından temin edilmiştir. Silis dumanı ise Dubai'den ithal olarak temin edilmiştir. Yoğunluğu 0,25-0,35 kg/l olup, 45 µm elek üzerinde kalan miktarı ise %0,58'dir. XRD analizi, silis dumanının tamamıyla amorf olduğunu göstermiştir (Şekil 5.4). Şekil 5.5'te verilen SEM görüntüsü ise, tanelerin oldukça ince olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.4 Silis dumanının XRD analizi.

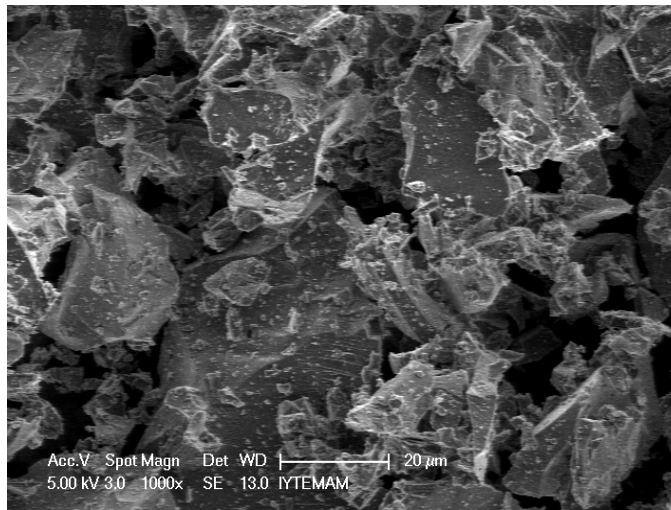


Şekil 5.5 Silis dumanının SEM (SE) görüntüsü.

Ayrıca, ticari olarak üretilen ve sıva alçısı olarak piyasada satılan %100 doğal alçı kullanılarak da deneyler yapılmıştır.

#### 5.1.4 Agregat

Deneysel çalışma kapsamında agregat olarak maksimum tane çapı 4 mm olan kireçtaşı, kuvars ve boksit kullanılmıştır. Kullanılan agregatların granülometri eğrileri ilgili bölümlerde verilmiştir. Kuvars agregasının SEM görüntüsü Şekil 5.6'da verilmiştir. Agregat yüzeylerinin oldukça pürüzsüz olduğu ve tanelerin keskin köşeli yapıda olduğu görülmektedir.



Şekil 5.6 Kuvars agregasının SEM (SE) görüntüsü.



### **5.1.5 Sodyum Hidroksit ve Cam Suyu**

Kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) ve cam suyu Merck firmasınca üretilen ticari ürünlerdir. Sodyum hidroksit %97 saflıkta olup, granül halde temin edilmiştir. Cam suyunun (sıvı sodyum silikat) ortalama kimyasal kompozisyonu %8 Na<sub>2</sub>O, %27 SiO<sub>2</sub> ve %65 H<sub>2</sub>O'dan oluşmaktadır. Malzemelerin kimyasal kompozisyonu üretici firma kataloğundan temin edilmiştir.

### **5.1.6 Akışkanlaştırıcı Katkı**

RPC üretimine yönelik deneylerde BASF firmasınca üretilen polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan Glenium ACE 30 adlı süper akışkanlaştırıcı (SA) kimyasal katkı kullanılmıştır.

### **5.1.7 Çelik Lif**

Pirinç kaplı, 6 mm boyunda 0,16 mm çapında (lif narinliği 37,5) ve 13 mm boyunda 0,16 mm çapında (lif narinliği 81,25) ayrıık yüksek dayanımlı çelik lif kullanılmıştır. Liflerin çekme dayanımı 2250 MPa'dır. Malzeme özellikleri üretici firma BEKSA A.Ş. firmasından temin edilmiştir.

## **5.2 Yöntem**

Deneysel çalışmanın yürütülmesi esnasında uygulanan yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

### **5.2.1 Karışımların Hazırlanması**

İlk iki aşamadaki deneylerde kullanılan harç karışımları, Hobart mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Karıştırma işleminde homojen bir karışım sağladığı ön deneylerle tespit edilen, aşağıda verilen yöntem kullanılmıştır. Öncelikle, homojen bir kuru karışım elde etmek amacıyla, agrega ve bağlayıcılar 1 dakika karıştırılmıştır.

Su ilavesinin ardından 1,5 dakika düşük devirde ve 1,5 dakika yüksek devirde karıştırma yapılarak karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm boyutlu prizma kalıplara iki tabaka halinde her tabaka 1 dakika sarsma tablasında sarsılarak ve aynı zamanda 25 tokmak darbesi ile sıkıştırılarak yerleştirilmiştir.

Reaktif Pudra Betonu (RPC) üretimine yönelik deneylerde, karışımların hazırlanmasında yüksek devirli bir karıştırıcı kullanılmıştır. ARPC (alkalilerle YFC'nin aktivasyonu yöntemiyle üretilen RPC) karışımlarının hazırlanmasında ise, öncelikle agrega dışındaki bileşenler yavaş devirde (99 devir/dak) kuru olarak karıştırılarak bileşenlerin homojen dağılımı sağlanmıştır. Karıştırma konumunda aktivatör çözeltilisinin ilavesi yapılmış ve yüksek devirde (470 devir/dak) karıştırma yapılarak, karışımın akışkan hale gelmesi sağlanmıştır (2 dakika). Daha sonra yavaş devirde karıştırma yapılarak agregalar ilave edilmiş (1-1,5 dakika) ve yüksek devirde karıştırma yapılarak (2 dakika) karışımın homojen bir hal alması sağlandıktan sonra, çelik lifler ilave edilmiştir. Karıştırma işlemine yüksek devirde çelik lifler çimento harcı içinde tamamen dağılana kadar devam edilmiştir (yaklaşık 3-4 dakika). KRPC (klasik PÇ bağlayıcılı RPC) karışımında da benzer bir karıştırma yöntemi uygulanmış olup, ilk aşamada bağlayıcılar ve agregaların tamamı kuru olarak karıştırılmıştır, daha sonra su ve kimyasal katkı en son ise çelik lifler karışıma dahil edilmiştir.

Örnekler kalıptan çıkarılıncaya kadar priz süresince neme doymun ortamda yaklaşık 20 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Mekanik deneyler en az üç numune üzerinde yapılmıştır. Deneysel verilerin değerlendirilmesinde ortalama değerler kullanılmıştır.

### ***5.2.2 İşlenebilirlik Deneyleri***

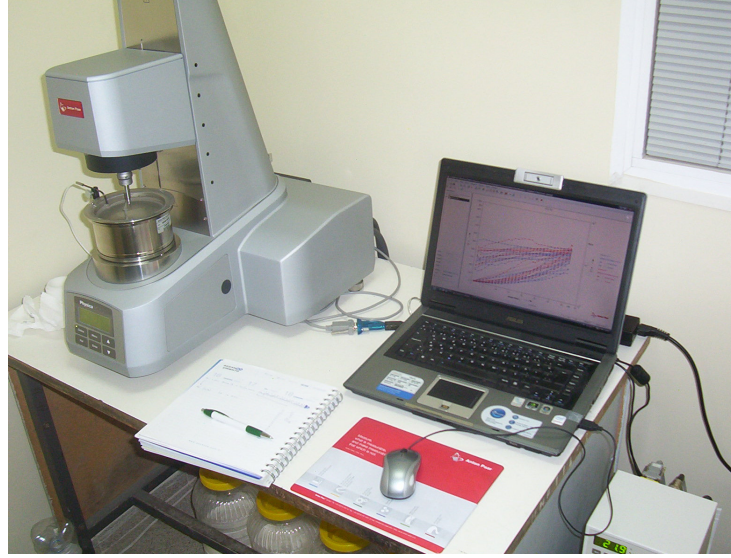
Harç karışımlarının işlenebilirliği ASTM C 230 “Standard Specification for Flow Table for use in Tests of Hydraulic Cement” standardında tanımlanan yayılma tablası ile belirlenmiştir. Karışımlar hazırlandıktan hemen sonra ASTM C 348 “Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars” standardında

belirtildiği gibi 25 kez yayılma tablasında düşürülmüştür. Kumpas yardımıyla birbirine dik doğrultuda iki çap ölçülmüş ve bu iki değerin ortalaması ilgili bölümlerde yayılma çapı olarak verilmiştir. Deney verileri Bölüm 6.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.1, 7.5.2, 7.5.3, 7.6 ve 8.1’de verilmiştir.

### ***5.2.3 Reolojik Ölçümler***

Karışımların Reolojik ölçümlerinde Şekil 5.7’de görülen Anton Paar marka Physica MCR 51 serisi reometre kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlar reometre haznesine yerleştirildikten sonra hazne reometreye monte edilmiştir. Deneyin sabit sıcaklıkta (20 °C) yapılabilmesi reometre sisteminin bir parçası olan su banyosu sistemi ile sağlanmıştır.

Kullanılan reometre sistemi, bilyeli ölçüm düzeneğinden (Ball measuring system-BMS) oluşmaktadır. Bilye çapı 8 mm olup, bilye eksantrik bir kol vasıtasıyla karışım içinde dönmektedir. Bilyenin karışım içinde sürüklenmesi sırasında, dönme hızı ve moment ölçülmekte ve reolojik parametrelere ulaşılmaktadır. Cihazın ulaşabileceği en yüksek deformasyon hızı  $35 \text{ s}^{-1}$ , ölçülebilecek en yüksek kayma gerilmesi ise 2850 Pa’dır. Deformasyon kontrollü ölçümlerde cihazın ölçtüğü ham veriler, dönme hızı ( $\Omega$ ) ve moment (T)’tir. Rheoplus programıyla ham verilere Schatzmann (2005) dönüşümü yapılarak dönme hızı ( $\Omega$ ) deformasyon hızına ( $\dot{\gamma}$ ), moment (T) ise kayma gerilmesine ( $\tau$ ) dönüştürülmektedir. Kayma gerilmesi ve deformasyon hızı arasındaki ilişki yardımıyla anlık viskozite değerleri program tarafından hesaplanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Bölüm 8.1’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Anton Paar-Physica MCR 51 Reometresi.

#### ***5.2.4 Priz Sürelerinin Belirlenmesi***

Harç karışımlarının priz süresi TS EN 196-3 “Çimento Dene Metotları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Hacim Genleşme Tayini” standardına göre Vicat iğnesi kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler sabit kıvam yerine, mekanik dayanımları elde edilen karışımların priz davranışını simule edebilmek amacıyla, sabit su/bağlayıcı oranında yapılmıştır. Deney verileri Bölüm 6.2 ve 8.1’de verilmiştir.

#### ***5.2.5 Basınç ve Eğilme Deneyleri***

Eğilme deneyi, 40x40x160 mm boyutlu prizmatik örnekler üzerinde ASTM C 348 standardına göre 120 mm mesnet açıklığı kullanılarak ve tek noktadan yük kontrollü yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Basınç dayanımı, eğilme deneyi sonrası elde edilen iki parça üzerinde ve 50 mm ayrıtlı küp örnekler üzerinde belirlenmiştir.

Eğilme deneyi 3, basınç dayanımı deneyi ise eğilme sonrası basınç dayanımı durumunda 6, küp örnek kullanımı durumunda ise 3 örnek üzerinde belirlenmiş ve

ortalama dayanım değeri olarak ilgili kısımlarda verilmiştir. Deney verileri, Bölüm 6.3, 7.2, 7.3 ve 7.4'te verilmiştir.

### **5.2.6 Kuruma Büzülmesi**

Kuruma büzülmesi ölçümleri 25x25x285 mm boyutlu prizmatik harç çubuğu örnekleri üzerinde ASTM C 596 “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement” standardına uygun olarak belirlenmiştir. Hazırlanan karışımlar, 24 saat sonra kalıptan sökülmüş ve 2 gün süre ile 20 °C sıcaklıkta su içerisinde kür edildikten sonra atmosfer koşullarında bekletilmiştir. Buhar kürü ve otoklav kürüne maruz bırakılmış numunelere su kürü uygulanmamıştır. Harç çubuklarının boy değişimi 0,002 hassasiyetindeki komparatör yardımıyla ölçülmüştür. Deneyler 2 numune kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, ilgili bölümlerde (Bölüm 6.4, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.1 ve 8.5) bu iki değerin ortalaması verilmiştir.

### **5.2.7 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Geçirimli Boşluk Oranı Tayini**

Harç karışımlarının kapiler su emme miktarları ASTM C 1403 “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars” standardına göre, 90 gün süreyle 20 °C sıcaklıkta su kürüne maruz bırakılmış harç numuneleri üzerinde belirlenmiştir. Harç numuneleri, 24 saat süreyle 110 °C sıcaklıkta kurutulduktan ve oda sıcaklığına soğuduktan sonra bir yüzeyinden yaklaşık olarak 3 mm suya gömülerek zamana bağlı olarak kapiler yolla emilen su miktarı ölçülmüştür. Kapiler su emme miktarı, 15. dakika, 1. saat, 4. saat ve 24. saatte, 0,001 g hassasiyetli terazi kullanılarak belirlenmiştir. Harç numuneleri tarafından emilen suyun buharlaşma ile kaybını önleme amacıyla, örnekler deney esnasında yalıtımlı bir kap içerisinde bekletilmiştir.

Su emme miktarı ve bağlantılı boşluk miktarı ASTM C 642 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete” standardına göre belirlenmiştir. Harç örneklerinin ağırlığı 100 °C sıcaklıkta kurutulduktan sonra

belirlenmiştir (A). Sonraki aşamada, numuneler 21 °C sıcaklığındaki su içerisinde 48 saat süreyle bekletilmiş ve kuru yüzey doygun ağırlığı belirlenmiştir (B). Daha sonra bu numuneler 5 saat süreyle kaynar su içerisinde kaynatılmış ve kontrollü olarak 16 saatte oda sıcaklığına soğutulduktan sonra kuru yüzey doygun haldeki ağırlığı belirlenmiştir (C). Son olarak, numunenin su içerisindeki ağırlığı belirlenmiştir (D). Aşağıdaki bağıntılar yardımıyla su emme ve geçirimli boşluk oranları belirlenmiştir. Deney verileri Bölüm 6.5 ve 9.2’de verilmiştir.

$$Su\ emme(\%) = \frac{(B - A)}{A} * 100 \quad (5.1)$$

$$Geçirimli\ boşluk\ (\%) = \frac{(C - A)}{(C - D)} * 100 \quad (5.2)$$

#### **5.2.8 Tokluk ve Kırılma Enerjisinin Belirlenmesi**

Tokluk 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde, deformasyon kontrollü olarak tek noktadan yükleme yapılarak belirlenmiştir. Deneylerde 130 mm mesnet açıklığı kullanılmıştır. Aynı zamanda numunenin eğilme dayanımı da belirlenmiştir.

Deney sırasında ani enerji boşalmasının önlenmesi ve tüm kırılma süreci boyunca numune kırılıp iki parçaya bölününceye kadar, yük-sehim eğrilerinin kaydedilebilmesi için prese geri beslemeli olarak, numunelerin orta nokta sehimlerini ölçen Heidenhein marka 1 µm ölçüm hassasiyetinde optik encoder verileri kullanılmıştır. Deney bu şekilde kapalı çevrimli olarak lifsiz seriler için numune tamamen kırılıp yük taşıyamaz hale gelene kadar 0,02 mm/dak hızında; lifli seriler için ise 3 mm orta nokta sehimine ulaşıncaya kadar 0,2 mm/dak hızında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan yük hücresi 20 kN kapasiteli ± % 0,5 hassasiyetindedir.

5 Hz frekansında çalışan veri toplama kartına alınan verilerden yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Bu eğrilerin altında kalan alan kullanılarak tokluk değeri hesaplanmıştır. Deney verileri, Bölüm 7.5, 7.6, 8.2 ve 9’da verilmiştir.

Lifsiz ve lifli serilerin kırılma enerjileri RILEM TC-50 FMC (1985) “Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams” Kırılma Mekaniği Teknik Komitesi’nce önerilen çentikli kiriş numuneler üzerinde belirlenmiştir. Örnek boyutları standartta belirtilenden farklı olup, 75x75x295 mm’dir. Deneyden önce sulu kesim yöntemiyle numunenin orta noktasına 25 mm derinliğinde, 5 mm genişliğinde çentik açılmıştır. Kullanılan eğilme deneyi düzeneği Şekil 5.8’de görülmektedir. Deneyde kullanılan yükleme hızları tokluk bölümündeki ile aynıdır. Deney verileri Bölüm 8.3’te verilmiştir.



Şekil 5.8 Deplasman kontrollü eğilme deneyi düzeneği.

Yük-sehim eğrileri, 5 Hz frekansında çalışan veri toplama kartına alınan yük-deplasman değerlerinden elde edilmiştir. Yük – sehim eğrilerinin altında kalan alan ( $W_0$ ) kullanılarak RILEM TC-50 FMC (1985)’de önerilen (5.3) formülü ile kırılma enerjileri ( $G_f$ ) belirlenmiştir.

$$G_f = \frac{W_0 + \left(\frac{L}{L'}\right) \cdot m \cdot g \cdot \delta_0}{B \cdot (H - a)} \quad (5.3)$$

Bu ifadede,  $m$  numunenin ağırlığını,  $L$  mesnet açıklığını,  $L'$  numune boyunu,  $g$  yerçekimi ivmesini ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $\delta_0$  açıklık ortasında son sehimi (bu değer çalışmada  $3 \text{ mm}$ 'dir),  $B$  kiriş eni,  $H$  kiriş yüksekliğini ve  $a$  ise çentik derinliğini göstermektedir. Kırılma enerjisi ( $G_f$ ),  $\text{N/m}$  veya  $\text{Joule/m}^2$  olarak ifade edilir.

Aşağıdaki formül kullanılarak çentikli numunelerin eğilme dayanımları da belirlenmiştir.

$$\sigma_{\text{eğilme}} = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot B \cdot (H - a)^2} \quad (5.4)$$

Bu ifadede  $P$ ,  $L$ ,  $B$ ,  $H$  ve  $a$  sırasıyla üç noktalı eğilme deneyinde kaydedilen en büyük yük, mesnet açıklığı, kiriş eni, kiriş yüksekliği ve çentik derinliğidir.

### 5.2.9 Silindir Yarma Deneyi

Silindir yarma dayanımı, TS EN 12390-6 “Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini” standardı ilkelerine göre belirlenmiştir. Deneyde kullanılan numunelerin çapı  $50 \text{ mm}$ , yüksekliği ise  $100 \text{ mm}$ 'dir. Deney verileri Bölüm 8.2'de verilmiştir.

### 5.2.10 Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Elastisite modülünün belirlenmesinde  $50 \text{ mm}$  çapında ve  $100 \text{ mm}$  yüksekliğinde silindir numuneler kullanılmıştır. Deneyden 1 gün önce numune yüzeyine  $20 \text{ mm}$  uzunluğundaki strain gauge adı verilen deformasyon ölçerler yatay ve dikey yönlerde yapıştırılmıştır. Veri toplama sistemi ile oluşan deformasyon ve yük verileri eşzamanlı olarak kaydedilmiş ve gerilme – birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu grafiklerden maksimum gerilmenin %5'i ile %35'i arasındaki

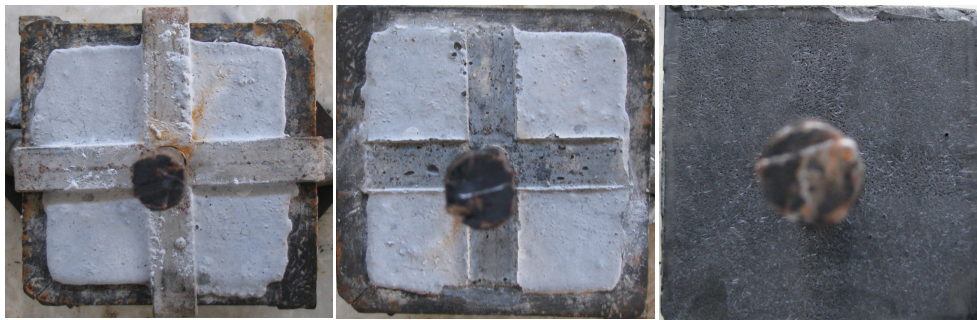


kısmından geçirilen doğrunun eğimi, elastisite modülü olarak göz önüne alınmıştır. Poisson oranı ise enine birim deformasyonun boyuna birim deformasyona oranlanmasıyla elde edilmiştir. Deney verileri Bölüm 8.2’de verilmiştir.

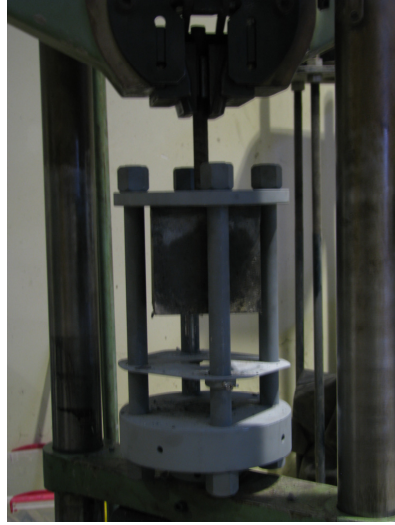
### 5.2.11 Çelik Donatıya Aderans

Çelik donatıya aderans deneyleri, 15 cm ayrıtlı küp numunelerin merkezine yerleştirilen çelik donatının ARPC ve KRPC karışımlarından çekilmesi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Çelik donatının beton içerisinde kalan kısmının her iki uçtan 40 mm’lik bölümü bantlanarak bu bölgelerde beton ile çelik arasında aderans oluşumu engellenmiştir. Bu işlemin amacı, aderans gerilmesinin maksimum ve minimum olduğu kısımları ortadan kaldırarak, gerilme dağılımının mümkün olduğunca üniform olmasını sağlamaktır. Sonuçta etkili aderans boyu, 70 mm olmuştur. Kullanılan donatı, nervürlü S 420 sınıfı çelik olup, 20 mm çapındadır.

Çelik donatının aksel olarak yerleştirilmesini sağlamak amacıyla, kalıbın alt ve üst kısmına merkezleyici aparatlar yerleştirilmiştir. Döküm ve kür aşamalarından sonra deneyden önce numune üst yüzeyi, kükürt-grafit karışımı başlık malzemesi kullanılarak pürüzsüz hale getirilmiştir (Şekil 5.9). Beton numune 40 ton kapasiteli yük kontrollü çekme presine alt kısımdan sabitlenmiş ve donatı üst çene vasıtasıyla çekilmiştir (Şekil 5.10). Deney sonuçları Bölüm 8.4’te verilmiştir.



Şekil 5.9 Aderans deneyi numune hazırlama aşamaları a) donatı merkezleme aparatı b) merkezleme aparatı çıkarıldıktan sonra c) yüzey kükürt-grafit karışımı ile düzeltildikten sonra.



Şekil 5.10 Aderans deneyi düzeneği.

Geliştirilen karışımın (ARPC) çelik donatıya aderansını klasik çimento bazlı RPC'lerle kıyaslamak amacıyla yapılan bu deney, standart bir deney yöntemi değildir.

### **5.2.12 Mikroyapı İncelemeleri**

Hidratasyon ürünlerinin mikroyapı ve kompozisyonları, SEM (taramalı elektron mikroskobu), EDS (enerji dağılım spektrometresi), XRD (X ışınları difraktometresi) analizleri yapılarak incelenmiştir. SEM analizinde, hem kırılmış harçlar üzerinde (SE modunda), hem de hazırlanan parlak kesitlerde (BSE modunda) incelemeler yapılmıştır. Kırık yüzey incelemelerinde kullanılan numuneler, altın kaplama vb. işlemlere tabi tutulmadan, pirinç plaka üzerine çift taraflı yapışkanlı karbon bant ile yapıştırılarak, ikincil elektron (SE - secondary electron) modunda incelenmiştir. Geri saçılımlı elektron (BSE - backscattered electron) modunda yapılan incelemelerde ise, numuneler polyester kalıba alınıp, yüzeyi parlatılmıştır. Hazırlanan polyester kalıplı örnek, önce çeşitli kalınlıklardaki zımpara kağıtlarıyla zımparalanmış, daha sonra mikron boyutundaki elmas pastayla parlatılmıştır. Örnekler, yüzeydeki elmas pasta kalıntılarını gidermek amacıyla ultrason cihazında 3 dakika süreyle saf su içerisinde titreşime maruz bırakılmıştır. İnceleme öncesinde numune yüzeyi altın ile kaplanmıştır. SEM incelemeleri Philips XL-30S-FEG marka SEM (Scanning Electron Microscope) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin boşluk boyutu dağılımları cıva porozimetresi deneyi ile belirlenmiştir. Deneyler, Quantachrome Corporation, Poremaster 60 marka cihazda yapılmıştır. Deneyde 414 MPa'a kadar basınç uygulanmış ve gözenek çapı 10,66 – 0,0036 µm arasındaki boşlukların oranı tayin edilmiştir.

Termal analizler (DTA (Diferansiyel Termal Analiz) /TGA (Termo Gravimetrik Analiz) / DTG (Derivative Termo Gravimetrik Analiz)) ve XRD (X ışınları kırınımı) analizleri öğütülerek toz haline getirilmiş harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Termal analizler, azot ortamında, 1000 °C sıcaklığa kadar 10 °C/dakika ısıtma hızında yapılmıştır. XRD analizleri, Philips X'pert pro marka cihaz ile, termal analizler ise Perkin Emler Diamond marka cihazda gerçekleştirilmiştir.

SEM, XRD ve DTA/TGA/DTG analizleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezinde, cıva Porozimetresi deneyleri ise ODTÜ Merkez laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney verileri Bölüm 6.6, 8.6 ve 9'da verilmiştir.

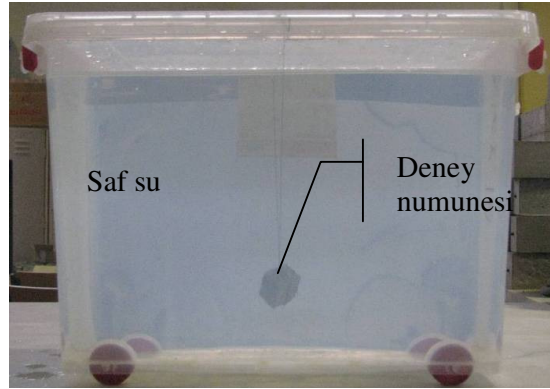
### **5.2.13 Dayamlılık Deneyleri**

Çalışmanın son aşamasında, üretilen iki RPC karışımının (ARPC ve KRPC) bazı durabilite özellikleri araştırılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, ARPC alkali aktivatör kullanılarak üretilen RPC karışımını, KRPC ise PÇ bağlayıcılı klasik RPC karışımını ifade etmektedir. Aşağıda bu kompozitlerin araştırılan durabilite özellikleri ve deney prosedürleri açıklanmıştır.

#### **5.2.13.1 Çözünme deneyi (Leaching)**

Teknik literatürde “leaching test” olarak adlandırılan bu deney ile numuneden çözünen iyonlar ve miktarları belirlenmektedir. Bu amaçla yaklaşık 30 g ağırlığında 25 mm ayrıtlı küp numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, ağırlığının 1000 katı saf su içerisine asılı olarak yerleştirilmiştir (Şekil 5.11). Periyodik olarak su örneği alınarak ICP-OES (İndüktif Kuplajlı Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi) cihazında analizleri yapılmıştır. ICP-OES, toprak elementlerinin saptanmasında tercih edilen

bir tekniktir. Her element, enerji düzeyine bağlı olarak kendine özgü emisyon yapabileceği dalga boylarına sahiptir. Dalga boyu ve emisyon şiddeti ölçülerek bir örnekte bulunan elementler ve miktarları saptanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan ICP-OES cihazı, VARION-710 ES modeli olup, deneyler DEÜ Maden Mühendisliği bölümünde yapılmıştır. Deney verileri Bölüm 9.1’de verilmiştir.



Şekil 5.11 Çözünme deneyi düzeneği.

#### 5.2.13.2 Çiçeklenme deneyi

Çiçeklenme deneyi, 75x75x150 mm boyutlu lifsiz ve lifli olarak üretilmiş ARPC ve KRPC karışımları üzerinde yapılmıştır. Örnekler plastik kaplar içerisine yatay olarak, 2 mm’lik kısmı suya gömülecek şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin üst kısmında çiçeklenme oluşup oluşmadığı görsel olarak kontrol edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.12’de verilmiştir. Deney ile ilgili gözlemsel değerlendirme Bölüm 9.3’te sunulmuştur.



Şekil 5.12 Çiçeklenme deneyi düzeneği.

### 5.2.13.2 Alkali silika reaksiyonu (ASR)

Lifli olarak üretilen ARPC ve KRPC karışımlarının ASR dayanıklılığı ASTM C 1260 “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)” standardına göre belirlenmiştir. 80 °C sıcaklıkta 1 M NaOH çözeltisi içerisinde bekletilen harç çubuklarının genleşmeleri 3 ay boyunca izlenmiştir. Deney verileri Bölüm 9.4’te verilmiştir.

### 5.2.13.3 Sülfat etkisi

Lifli olarak üretilen ARPC ve KRPC karışımları %10 MgSO<sub>4</sub> (pH=7,44) ve %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH= 8,16) çözeltilerine 6 ay süreyle maruz bırakılmıştır. ARPC ve KRPC karışımları çözeltide farklı kaplar içerisinde bekletilmiştir. Mekanik özelliklerdeki ve ağırlıktaki değişim 40x40x160 mm ayrıtlı prizmatik örnekler kullanılarak, boy değişimi ise 25x25x285 mm ayrıtlı harç çubukları kullanılarak belirlenmiştir. Çözelti, 1. ve 3. ay sonunda yenilenmiştir. Deney verileri Bölüm 9.5’te sunulmuştur.

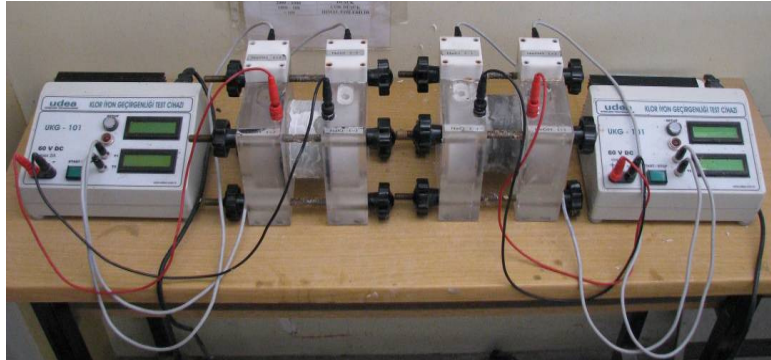
### 5.2.13.4 Sülfürik asit etkisi

Lifli olarak üretilen ARPC ve KRPC karışımları pH değeri 0,51 olan %5 sülfürik asit çözeltisine 6 ay süreyle maruz bırakılmıştır. Kullanılan numune boyutları ve deney yöntemi sülfat etkisi bölümündeki ile aynıdır. Çözelti, 1. ve 3. ay sonunda yenilenmiştir. Deney verileri Bölüm 9.6’da verilmiştir.

### 5.2.13.5 Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi

Hızlı klorür geçirimsizliği deneyi, ASTM C 1202-97 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardına göre lif içermeyen RPC matrislerinden hazırlanan 10 cm çapında ve 5 cm yüksekliğindeki disk numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneyden önce suya doymun hale getirilen numune, deney cihazının hücreleri arasına yerleştirilmiş ve numune yan yüzeyleri silikon ile kaplanarak geçirimsizliği sağlanmıştır. Hücrelerin

birinde %3 NaCl çözeltisi ve metal elektrot, diğerinde ise 0,3 M NaOH çözeltisi ve metal elektrot bulunmaktadır. Deney düzeneği Şekil 5.13'te görülmektedir.

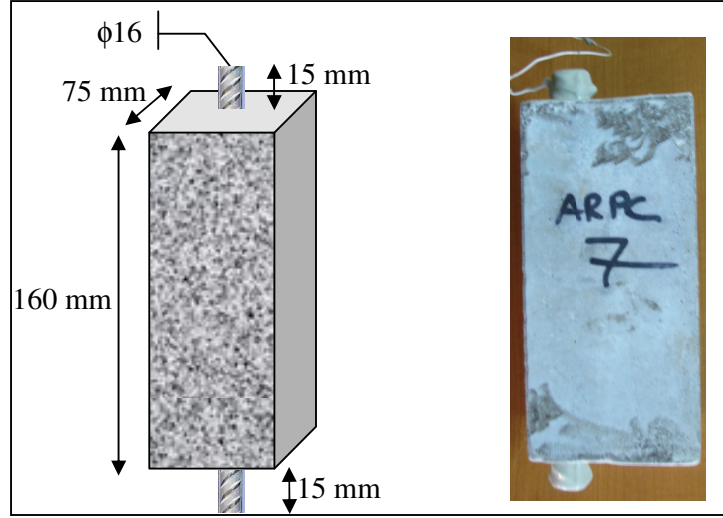


Şekil 5.13 Hızlı klorür iyonu geçirirliliği deney düzeneği.

Altı saat süre ile iki hücre arasında 60 V potansiyel uygulanmıştır. Deney süresi boyunca beton diskten geçen elektrik yükü coulomb biriminde yarım saatte bir kümülatif olarak kaydedilmiştir. Deney verileri Bölüm 9.7'de verilmiştir.

#### 5.2.13.6 Korozyon deneyleri

Korozyon deneylerinde kullanılan örneklerin hazırlanmasında ve korozyon ölçümlerinin yapılmasında Yiğiter (2008) tarafından hazırlanan “Betonarme donatısında klorid korozyonu gelişiminin elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi” adlı doktora tezinde kullanılan yöntemler uygulanmıştır. Deneyler 75x75x160 mm boyutlarındaki prizmatik donatılı örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Lif içermeyen karışımlar kullanılmıştır. Çelik donatılar 190 mm uzunluğunda olup örneğin köşesine, 1 cm pas payı oluşturacak şekilde yerleştirilmiştir. Numuneler yatay olarak dökülmüş ve donatıların sabitlenmesi amacıyla prizmanın üst ve alt taban bölümlerinde ahşap takozlar kullanılmıştır. Çelik donatıların uçları, 160 mm uzunluğundaki beton prizmanın her iki kenarından 15 mm açıkta bırakılmıştır. Donatılı numunelerin şematik çizimi ve fotoğrafı Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Donatılı korozyon örnekleri.

Çelik donatıların açıkta kalan kısımları buhar kürü sırasında korozyona uğramıştır. Bu kısımdaki korozyon ürünleri çelik tel fırça yardımıyla hassas bir şekilde temizlenmiştir. Korozyon ölçümlerinin yapılabilmesi için, çelik donatının açıkta kalan uçlarından birisine bakır bir tel bağlanmıştır. Bu işlemin ardından prizmatik örneklerin tabanlarına ve açıkta kalan çelik donatı kısımlarına iki tabaka halinde epoksi esaslı iki bileşenli koruyucu kaplama malzemesi (DEGUSSA-BASF Masterseal 180) uygulanmıştır. Bu işlemin amacı, beton içine gömülü çelik çubukların korozyon alanını sınırlamak ve çelik çubukların açıkta kalan kısımlarında gelişecek korozyonun ölçümleri etkilemesini engellemektir.

Epoksi kaplama iyice sertleştikten sonra ilk korozyon ölçümleri yapılmış ve numuneler 3 farklı küre maruz bırakılmıştır. Numunelerden 2 adedi, standart kür havuzunda (korozif olmayan su ortamında), 2 adedi atmosfer koşullarında, dört adedi ise, hızlandırılmış korozyon kabininde %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır (Şekil 5.15). Hızlandırılmış korozyon kabininde (% 3,5 NaCl çözeltisinde) bir çevrim:

- 120 dakika ıslanma (20 °C % 3,5 NaCl çözeltisi ile)
- 30 dakika kuruma (60 °C sıcak hava ile)
- 150 dakika kuruma (20 °C normal hava ile) aşamalarından oluşmaktadır.



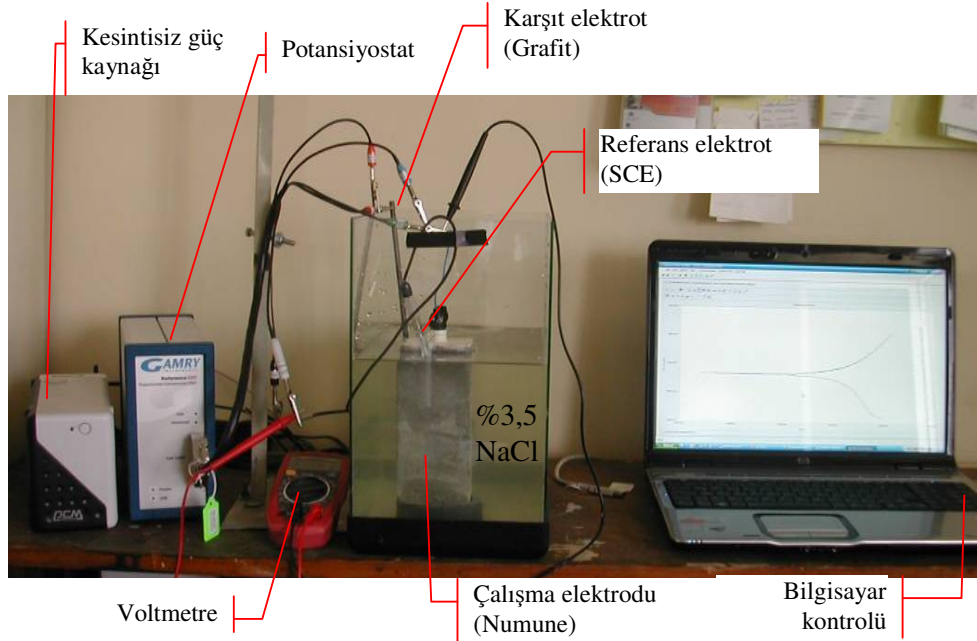
Şekil 5.15 Hızlandırılmış korozyon kabini.

Ölçümlerde Gamry REF600 Potentiostat/Galvonastat/ZRA, üç elektrotlu ölçüm sistemi kullanılmıştır (Şekil 5.16). Ölçümler, %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz numuneler üzerinde 100 çevrimde bir yapılmıştır. Su içerisinde ve atmosfer koşullarında bekletilen numuneler üzerinde yapılan ölçümler ise, söz konusu çevrime karşıt gelen günlerde yapılmıştır.

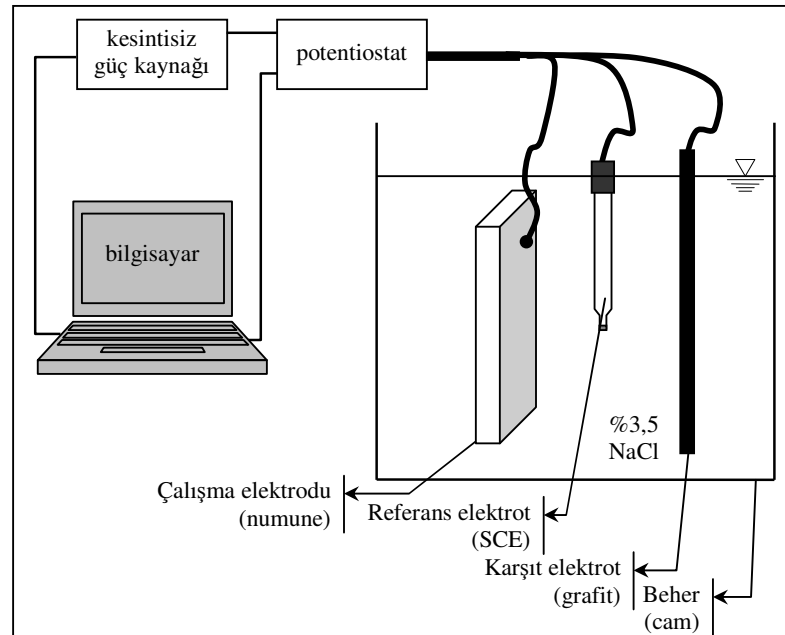
Sistemde elektrolitik ortam, sodyum klorür ve saf su kullanılarak hazırlanmış %3,5 NaCl çözeltisidir. Ortam sıcaklığı 20 °C'dir. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup karşıt elektrot grafitir. Çalışma elektrodu ise analizi yapılan numunelerdir. Oluşturulan elektrokimyasal hücrenin şematik çizimi Şekil 5.17'de, gösterilmiştir. Öncelikle deney yapılan numunelerin açık devre potansiyelleri belirlenmiştir. Çalışma elektrodunun potansiyeli, referans elektroda göre milivoltmetre ile ölçülmüştür. İkinci aşamada numunelere doğru akım ile anodik yönde polarizasyon uygulanmıştır. Açık devre potansiyelinde ölçülen değer  $\pm 150$  mV aralığında 0,2 mV/s tarama hızı ile polarizasyon eğrileri çıkarılmıştır.

Su içerisinde saklanan numunelerin potansiyel ölçümleri su içerisinde gerçekleştirilmiştir. Atmosfer koşullarında bekletilen numunelerin ölçümleri ise yüzeye yerleştirilen ıslak sünger kullanılarak yapılmıştır.



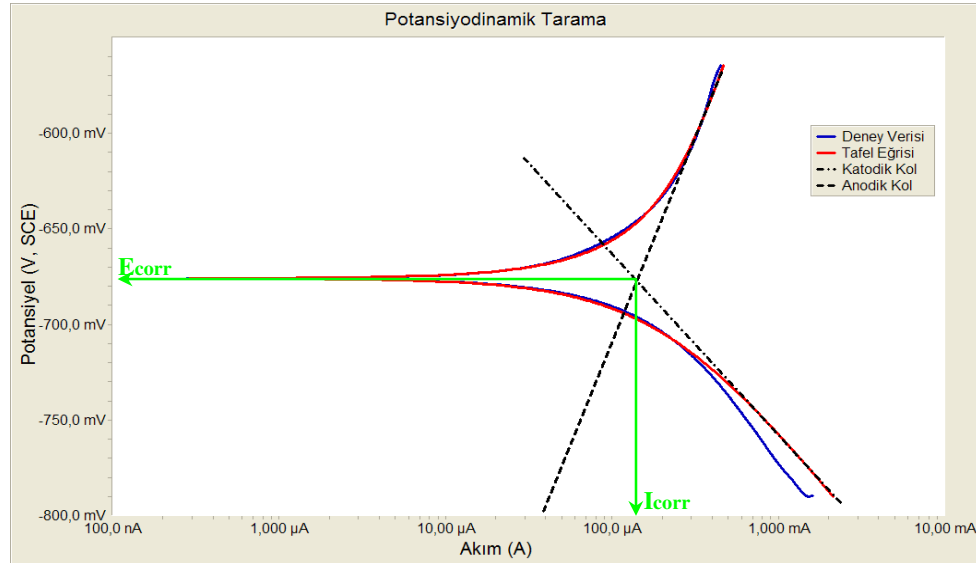


Şekil 5.16 Korozyon ölçüm sistemi.



Şekil 5.17 Üç elektrotlu sistem ile korozyon ölçümü deney düzeneği.

Şekil 5.18'de örnek bir eğri ve eğri üzerinde gerçekleştirilen ekstrapolasyon ile Tafel analizi görülmektedir. Tafel analizleri sonucunda numunelerin korozyon potansiyelleri ( $E_{corr}$ ) ve korozyon akım yoğunlukları ( $I_{corr}$ ) belirlenmiştir.



Şekil 5.18 Betonarme numunelerde polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi.

Beton içerisinde çıkarılan donatılardaki ağırlık kayıpları, donatı üzerindeki pas ürünleri ASTM G1 “Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens” standardında tarif edilen temizleme çözeltisi (Clarke Çözeltisi) ile temizlendikten sonra belirlenmiştir. Söz konusu temizleme çözeltisi, sıvı haldeki 1000 ml hidroklorik asit (HCl) ile toz haldeki 50 g kalay klorür ( $\text{SnCl}_2$ ) ve 20 g antimon oksit ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) karışımından elde edilmektedir. Donatıların iki ucundaki epoksi kaplı bölgeler ise, ancak tel fırça ile mekanik olarak temizlenebilmiştir. Donatı ağırlıklarının belirlenmesinde 0,001 g hassasiyetli terazi kullanılmıştır.

Ayrıca, ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan 10 cm ayrıtlı lifsiz küp numuneler yarılarak klor işleme derinlikleri belirlenmiştir. Korozyon deneyi verileri Bölüm 9.8’de verilmiştir.

### 5.2.13.7 Karbonatlaşma

Lifsiz ARPC ve KRPC karışımlarından 75 mm ayrıtlı küp numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler 6 ay süreyle pH değeri 8,3 olan 0,352 M NaHCO<sub>3</sub> çözeltisine (karbonatlaşmış su) maruz bırakılmıştır. Çözelti 1. ve 3. ay sonunda yenilenmiştir. Numuneler belirli periyotlarla yarılmış ve yüzeye %0,1 phenolphthalein alkol eriyiği püskürtülerek pH'ı 8,3 değerinin altına düşen tabaka kalınlığı belirlenmiştir. Bu yöntemde, karbonatlaşmamış tabaka kırmızı-mor renk alırken, pH değeri 8,3'ün altında olan kısımda renk değişimi görülmemektedir.

Bir kısım numune ise atmosfer koşullarında bekletilerek aynı yöntemle karbonatlaşma derinlikleri belirlenmiştir. Karbonatlaşma deneyi verileri Bölüm 9.9'da verilmiştir.

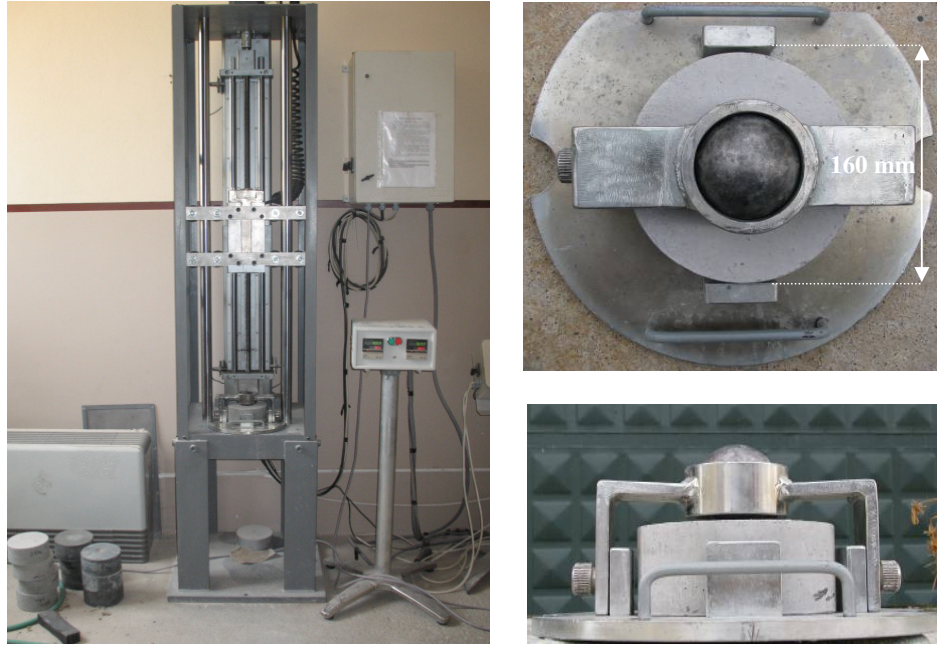
### 5.2.13.8 Aşınma deneyi

ARPC ve KRPC karışımlarından 71 mm ayrıtlı lifli ve lifsiz küp örnekler hazırlanmıştır. Örneklerin aşınma dayanıklılığı TS 2824 EN 1338 (2005) "Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları" standardına uygun olarak Böhme aşındırma tablası kullanılarak belirlenmiştir. Deneye başlamadan önce numunelerin ağırlıkları ve belirlenen 4 farklı noktadan yükseklikleri ölçülmüştür.

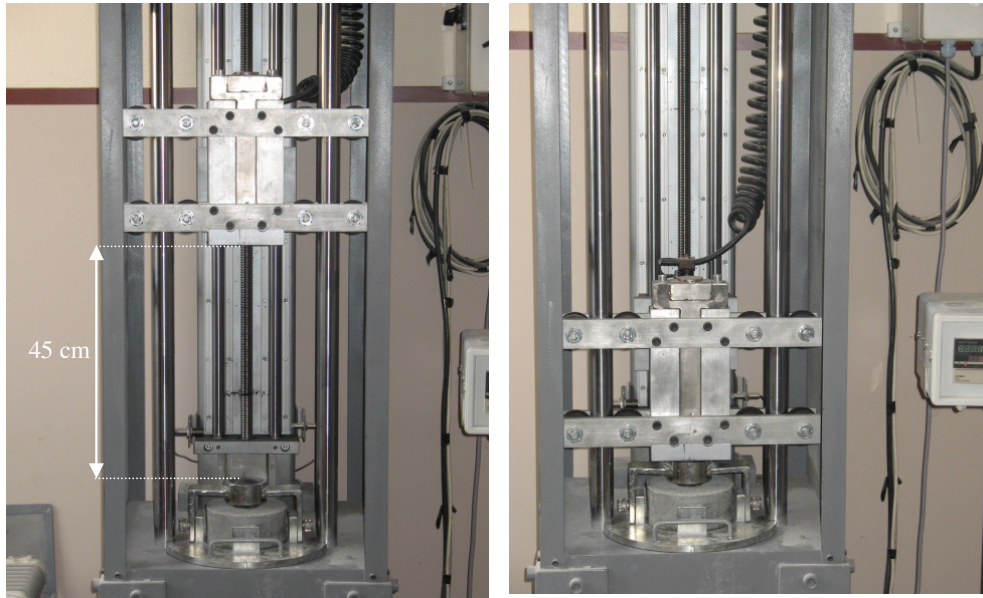
Deney cihazına yerleştirilen numuneler üzerine 294 N'luk eksenel yük uygulanmış, aşındırma izine 20 g standart aşındırıcı toz konulduktan sonra 22 devirlik aşındırma turuna maruz bırakılmıştır. Her 22 devirden sonra numune ve tabla yüzeyi temizlenip tekrar standart aşındırıcı toz konulduktan sonra numune 90 derece döndürülüp sıradaki yüzey 22 devirlik aşınma etkisine maruz bırakılmıştır. Böylelikle numune yüzeyi toplamda 352 devirlik aşınma etkisine maruz bırakılmıştır. Deney sonunda numunelerin ağırlık ve yükseklikleri tekrar ölçülmüş, kayıplar belirlenmiştir. Deney verileri Bölüm 9.10'da verilmiştir.

### 5.2.13.9 Darbe deneyi

Darbeye dayanıklılık deneyi, lifli ve lifsiz durumda ARPC ve KRPC karışımları üzerinde yapılmıştır. Deneyler, çapı 150 mm yüksekliği 64 mm olan disk örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyinde kullanılan cihaz ve numune hücresi detayı Şekil 5.19’da görülmektedir. Deneyler, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Kullanılan darbe cihazı özel imalat olup, düşürülen ağırlık, düşme yüksekliği ve darbe sayısı ayarlanabilir niteliktedir. Darbe deneyi düzeneği ve deney yöntemi Schrader (1981) tarafından önerilmiştir. Deney cihazı ve deneyin yapılışı ACI 544 (1988) “Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete” komite raporunda tanımlanmıştır. Bu standarda göre, 4,5 kg ağırlık 45 cm yükseklikten düşürülerek, gözle görülebilen ilk çatlağın olduğu darbe sayısı ve numunenin örnek etrafında bulunan örnekten 5 mm uzaklıktaki 4 engelden herhangi 3 tanesine temas ettiği darbe sayısı (nihai darbe dayanımı olarak adlandırılır) bulunmaktadır. Numune 4 engelden 3 tanesine temas etmeden önce ikiye ayrılırsa bu durumda, numunenin ikiye ayrılması için gerekli darbe sayısı nihai darbe dayanımı olarak alınmaktadır. Bu çalışma kapsamında üretilen numuneler, beklendiği gibi çok yüksek darbe dayanıklılığına sahiptir. Bu nedenle, standartta verilen 4,5 kg ağırlık oldukça yetersiz olup, bunun yerine 20 kg ağırlık 45 cm yükseklikten düşürülmüştür. Bu durumda darbe etkisi 10,7 saniyede bir uygulanmıştır (Şekil 5.20). Lifsiz numuneler üzerinde 45 cm yükseklikten düşürme etkisinin yanı sıra ağırlık 20 cm yükseklikten düşürülerek de deneyler yapılmıştır. Bu durumda ise darbe etkisi her 5,2 saniyede bir uygulanmıştır. Deney verileri Bölüm 9.11’de verilmiştir.



Şekil 5.19 Darbe deney cihazı ve örnek hücresi.



Şekil 5.20 Darbe deney cihazı çalışma adımları a) düşürülen ağırlık ilk pozisyonu, b) düşme anı.

#### 5.2.13.10 Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık deneyi

40x40x160 mm ayrıtlı prizmatik örnekler, 200, 300, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara 10 °C/dak hızla ısıtılmış ve ilgili sıcaklığa 3 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisiyle numunelerde oluşan ağırlık, boy ve mekanik

özelliklerdeki (basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk) değişimler belirlenmiştir. Numunelerde sıcaklıkla oluşan boy değişimleri, numune uçlarına yerleştirilen çelik pimler vasıtasıyla, komparatörde ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Komparatörün ölçüm aralığının dışına çıkan ölçümlerde ise, kumpas vasıtasıyla ölçüm yapılmıştır. Ölçümler numune oda sıcaklığına ulaştıktan sonra yapılmıştır. Deney verileri Bölüm 9.12’de verilmiştir.

#### *5.2.13.11 Donma-çözülme deneyi*

Lifli olarak üretilen 40x40x160 mm boyutlu ARPC ve KRPC karışımları donma-çözülme kabiniinde 150 çevrim donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış, mekanik özellikler ve ağırlıktaki değişiklikler belirlenmiştir. Deney verileri Bölüm 9.13’te verilmiştir.

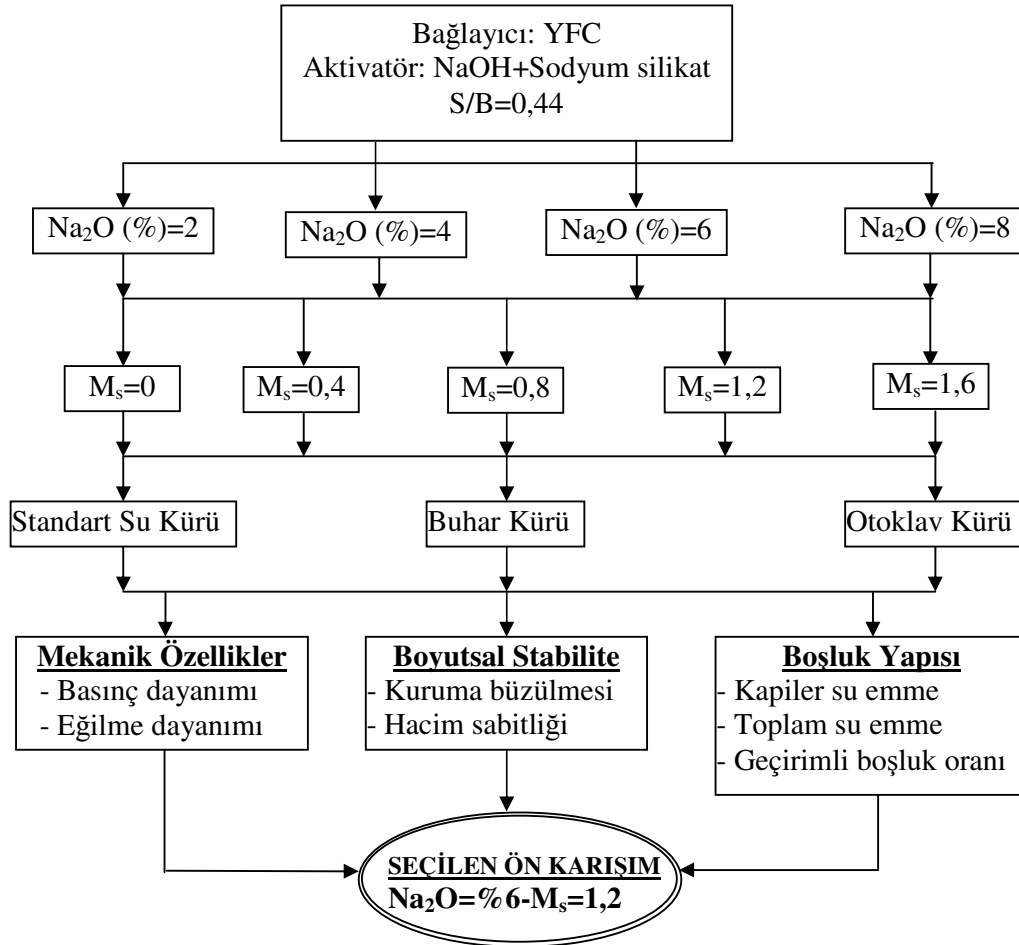
Kullanılan donma-çözülme kabini, donma ve çözme işlemlerini otomatik olarak yapabilmektedir. Ayrıca, kabin donma modundan çözme moduna geçişte termal şokları önlemek amacıyla ortama ılık hava üfleme sistemine sahiptir. Bir çevrim 16 saat sürmekte olup, 14 saat havada dondurma ve 2 saat su içerisinde çözme işleminden oluşmaktadır. Sahadaki gerçek koşulların yansıtılması amaçlandığından ASTM C 666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing” standardında önerilen dondurma hızından daha yavaş (yaklaşık yarısı) bir soğutma hızı uygulanmıştır. Çözme işlemi suda, dondurma işlemi ise havada yapılmıştır.

### **5.3 Hazırlanan Karışımlar**

Gerçekleştirilen deneysel çalışma dört temel aşamadan oluşmaktadır. Aşağıda her bir aşamada, incelenen deney değişkenlerini ve yapılan deneyleri gösteren deneysel program ayrıntıları verilmiştir.

### 5.3.1 Birinci Aşama Deneyler

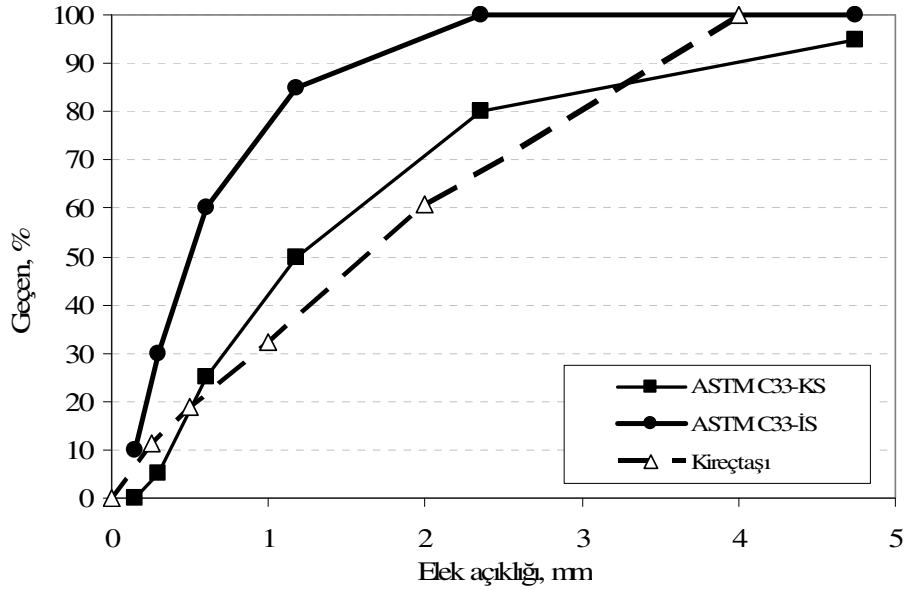
Bu bölümde 20 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Ayrıca kıyaslama yapabilmek amacıyla, bağlayıcısı çimento olan bir kontrol karışımı hazırlanmıştır. Deneysel çalışma akış şeması Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21 Birinci aşama deneylerin akış şeması.

Harç karışımlarının Agrega/YFC oranı 2,75, Su/YFC oranı ise 0,44'tür. Bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımı için de bu oranlar kullanılmıştır. Agrega olarak en büyük tane büyüklüğü 4 mm olan kireçtaşı kullanılmıştır. Kireçtaşı agregasının kuru özgül ağırlığı 2,57, su emmesi ise %1,43'tür. Şekil 5.22'de

ASTM C 33 “Standard Specification for Concrete Aggregates” standardında verilen incelik ve kabalık sınırlarıyla birlikte agreganın granülometri eğrisi verilmiştir.

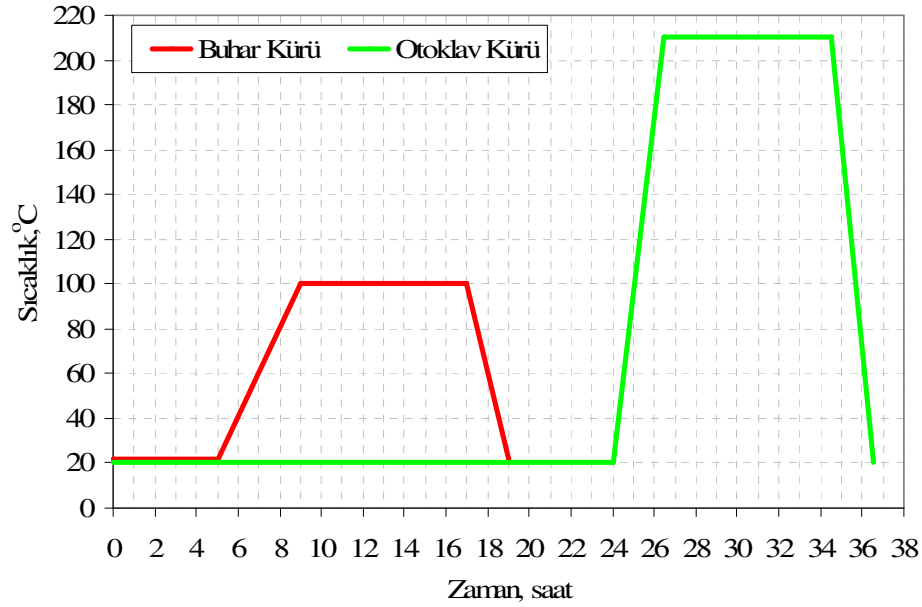


Şekil 5.22 Birinci aşama deneylerde kullanılan kireçtaşı agregasının granülometri eğrisi.

Hazırlanan harç karışımlarında kullanılan aktivatörün  $\text{Na}_2\text{O}$  oranı ve  $M_s$  oranı ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) değiştirilmiştir. YFC ağırlığının %2, %4, %6 ve %8'i oranında  $\text{Na}_2\text{O}$  ve her bir oran için 0, 0,4, 0,8, 1,2 ve 1,6  $M_s$  oranlarında karışımlar hazırlanmıştır. Taze halde karışımların işlenebilirliği belirlenmiştir. Hazırlanan harç karışımlarından 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm ayrıtlı prizmatik örnekler hazırlanmıştır.

3 farklı kür yöntemi (otoklav kürü, buhar kürü ve standart su kürü) uygulanmıştır. Otoklav kürü durumunda hazırlanan harç karışımları 24 saat sonra kalıptan sökülmüş ve 210 °C sıcaklıkta (2 MPa basınç altında) 8 saat süreyle kür edilmiştir. Buhar kürü durumunda ise, hazırlanan harç karışımları 5 saat ön bekleme süresinin ardından 8 saat süreyle 100 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. Şekil 5.23'te ısıl işlem çevrimi grafiksel olarak verilmiştir.



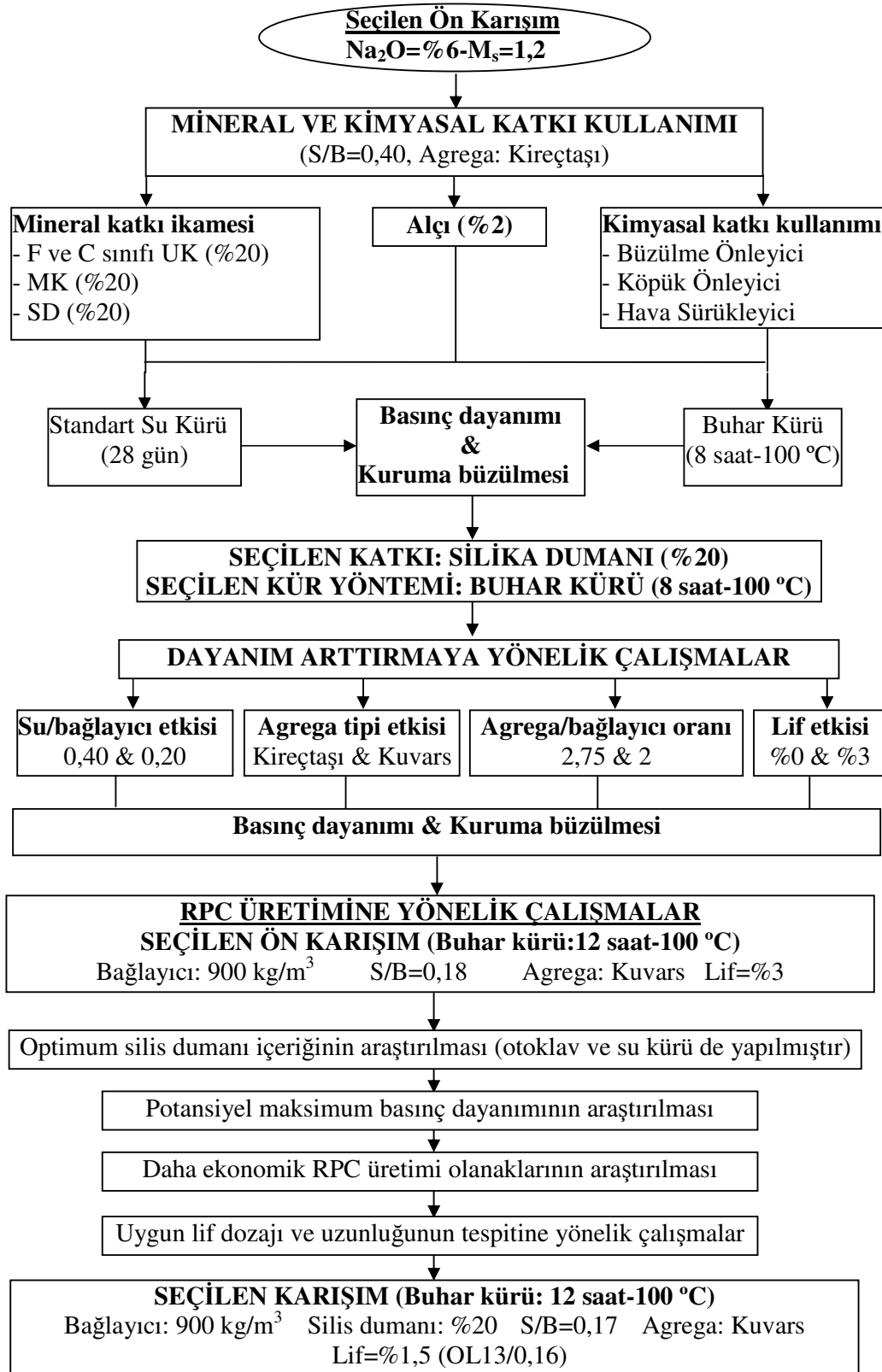


Şekil 5.23 Birinci aşama deneylerde uygulanan ısı işlem çevrimleri.

Karışımların basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kuruma büzülmesi belirlenmiştir. Ayrıca seçilen karışımların boyutsal stabilitesi, geçirimli boşluk oranı, kapiler ve toplam su emme değerleri belirlenmiştir. Deney verileri Bölüm 6'da verilmiştir.

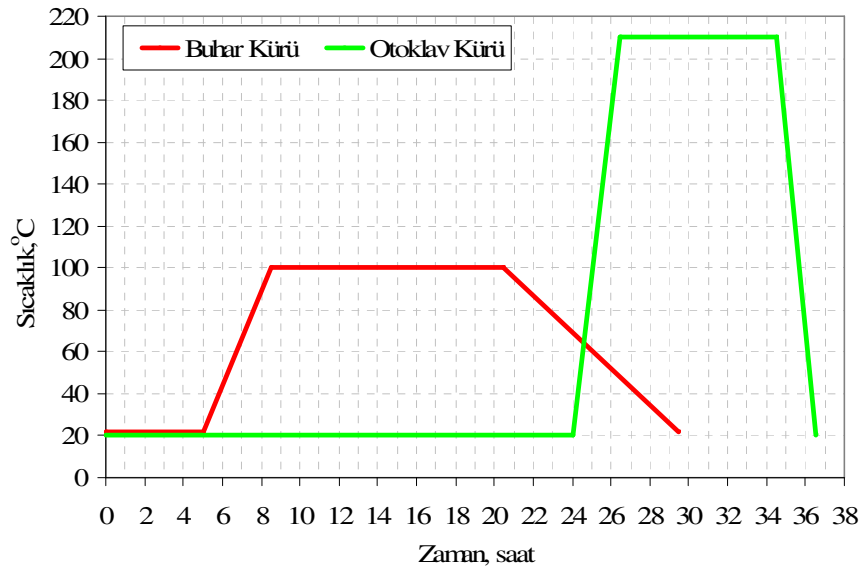
### 5.3.2 İkinci Aşama Deneyler

Bu aşamada mineral ve kimyasal katkı kullanımının etkileri araştırılmış, devamında seçilen karışım üzerinde dayanım arttırmaya yönelik deneyler ve Reaktif Pudra Betonu (RPC) üretimine yönelik deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmanın akış şeması Şekil 5.24'te verilmiştir. Mineral ve kimyasal katkıların etkisinin incelendiği bölümde hazırlanan karışımların su/bağlayıcı oranı 0,40'tır. Basınç dayanımı 50 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Uygulanan buhar kürü çevrimi önceki bölümdeki ile aynıdır. Agrega olarak Şekil 5.22'de granülometri eğrisi verilen kireçtaşı agregası kullanılmıştır.

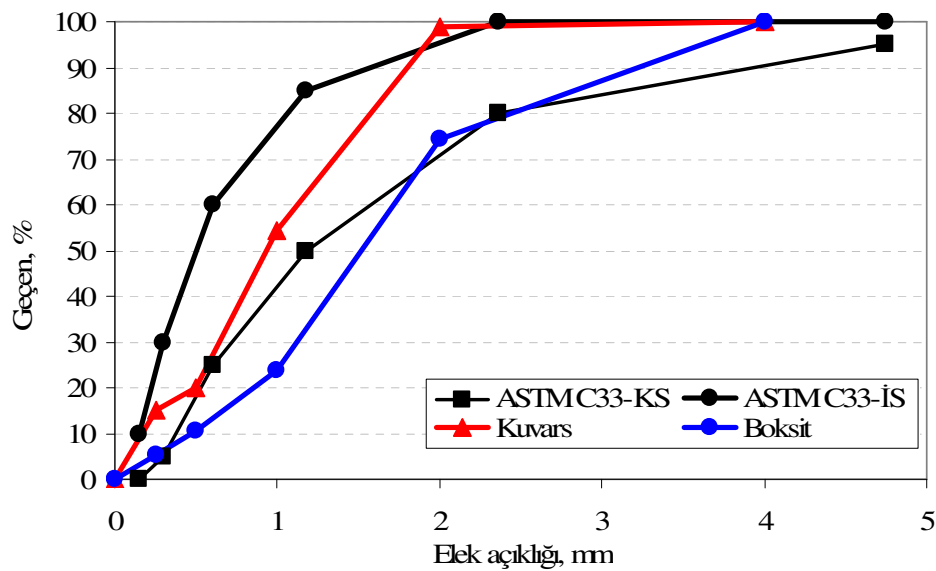


Şekil 5.24 İkinci aşama deneylerin akış şeması.

RPC üretimine yönelik deneylerde, agrega olarak boksit kullanımının, çözelti özelliklerinin, lif dozajının ve uzunluğunun mekanik özelliklere etkileri belirlenmiştir. Bu deneylerde, daha yüksek dayanım değerleri elde etmeye yönelik olarak buhar kürü süresi 12 saate yükseltilmiştir. Uygulanan buhar ve otoklav kürü çevrimleri Şekil 5.25'te verilmiştir. Kullanılan agregaların granülometri eğrileri ise Şekil 5.26'da verilmiştir. Kullanılan kuvarsın kuru özgül ağırlığı 2,65, su emmesi %0,17'dir. Boksitin özgül ağırlığı 3,24, su emmesi ise %1,78'dir.



Şekil 5.25 İkinci aşama deneylerde uygulanan ısı işlem çevrimleri.

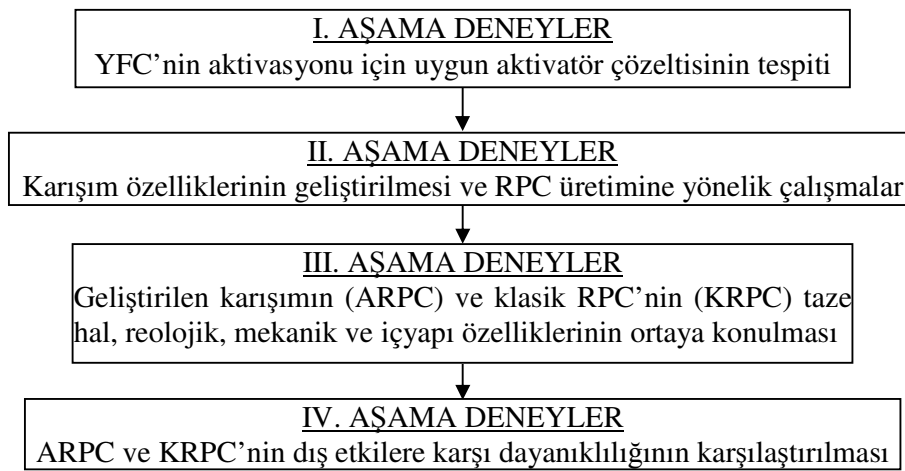


Şekil 5.26 RPC üretimine yönelik deneylerde kullanılan agregaların granülometri eğrisi.

Daha ekonomik ve üretim olanakları daha yüksek bir karışım elde edilmesine yönelik çalışmalar, buhar kürü ile üretilmiş %1,5 oranında OL 13/0,16 liflerini içeren bağlayıcı ağırlığının %4'ü oranında Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 1,2 olan karışımı işaret etmektedir. Bu nedenle, çalışmanın 3. ve 4. aşamasında bu karışım ile hazırlanan RPC karışımlarının (ARPC) mekanik ve durabilite özellikleri Portland çimentosu bağlayıcılı klasik RPC (KRPC) ile kıyaslanmıştır. Deney verileri Bölüm 7'de sunulmuştur.

### 5.3.3 Üçüncü ve Dördüncü Aşama Deneyler

Üçüncü bölümde, ARPC (alkalilerle aktive edilmiş RPC) ve KRPC (Portland çimentosu bağlayıcılı klasik RPC) karışımlarının taze hal özellikleri, mikroyapı özellikleri ve mekanik özellikleri (basınç dayanımı, silindir yarma dayanımı, eğilme dayanımı, kırılma enerjisi ve elastisite modülü) ortaya konulmuştur. Dördüncü bölümde ise bu iki karışımın durabilite özellikleri (sülfat etkilerine dayanıklılık, sülfürik asit dayanıklılığı, alkali silika reaksiyonu genleşmesi, çiçeklenme, su emme, karbonatlaşma direnci, donatı korozyonu, darbe etkilerine dayanıklılık, aşınma etkilerine dayanıklılık, yüksek sıcaklık dayanıklılığı, donma-çözülme dayanıklılığı vb.) karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Deney sonuçları, Bölüm 8 ve 9'da sunulmuştur. İlk iki aşama da dahil olmak üzere tüm deneysel çalışmanın akış şeması Şekil 5.27'de verilmiştir.



Şekil 5.27 Üçüncü ve dördüncü aşama da dahil deneysel çalışma aşamaları.

## BÖLÜM ALTI

### I. AŞAMA - OPTİMUM AKTİVATÖR DOZAJININ BELİRLENMESİ

Bu bölümde, yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktive edilmesinde kullanılan çözeltinin özellikleri ( $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s$  oranı olarak ifade edilen çözeltinin  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı) değiştirilerek farklı kür koşulları altında mekanik özelliklerin değişimi araştırılmıştır. Ayrıca, taze haldeki özellikler, boyutsal stabilite ve boşluk yapısına dair özellikler de incelenmiştir.

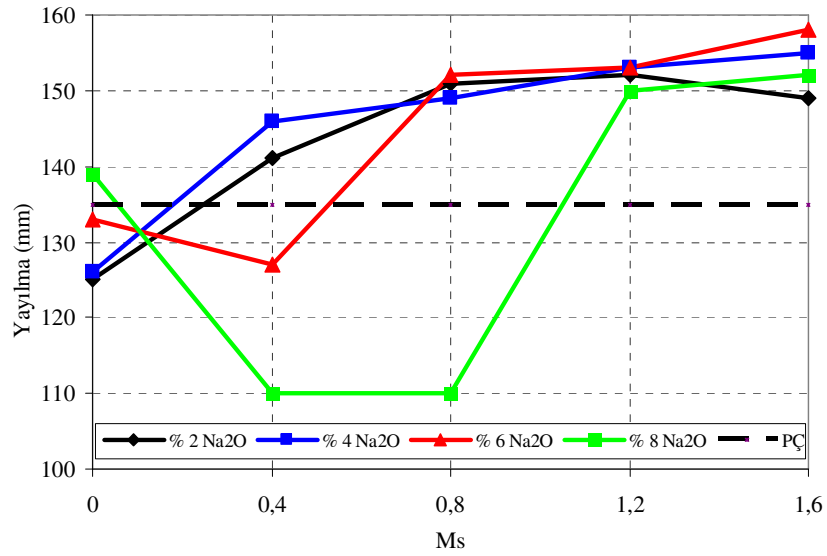
#### 6.1 İşlenebilirlik

Alkalilerle yüksek fırın cürufunun aktive edilmesiyle üretilen harç karışımlarının (AAH) yayılma değerleri, Tablo 6.1 ve Şekil 6.1’de verilmiştir. Bağlayıcısı Portland çimentosu (PÇ) olan harçlar için yayılma değeri 135 mm’dir.

Tablo 6.1 Harç karışımlarının yayılma çapı (mm)

$\text{Na}_2\text{O}$ , %	$M_s$				
	0	0,4	0,8	1,2	1,6
2	125	141	151	152	149
4	126	146	149	153	155
6	133	127	152	153	158
8	139	110	110	150	152

$M_s$  oranının artışı düşük  $\text{Na}_2\text{O}$  oranlarında (%2 ve %4) yayılma değerinin sürekli olarak artışıyla sonuçlanırken, %6  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında  $M_s=0,4$  için ve özellikle %8  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında  $M_s=0,4$  ve 0,8 için yayılma değerinde azalma oluşmuştur. Yayılma değerindeki bu önemli azalma, harç karışımlarının yerleştirilmesini önemli ölçüde zorlaştırdığından ileride değinilecek mekanik özellikleri de olumsuz yönde etkilemiştir. Bununla birlikte, bu noktalar dışında, genel eğilim  $M_s$  oranının artışıyla işlenebilirliğin artışı şeklindedir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artışı,  $M_s=0$  durumunda yayılma değerini arttırırken, yüksek  $M_s$  oranlarında (1,2 ve 1,6)  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının yayılma üzerindeki etkisi hemen hemen ortadan kalkmıştır. Bir başka deyişle,  $M_s$  oranının işlenebilirlik üzerindeki etkisi yukarıda belirtilen istisnai durumlar dışında  $\text{Na}_2\text{O}$  oranına kıyasla daha belirgindir.



Şekil 6.1 Yayılma çapının  $M_s$  ve  $Na_2O$  oranına bağlı olarak değişimi.

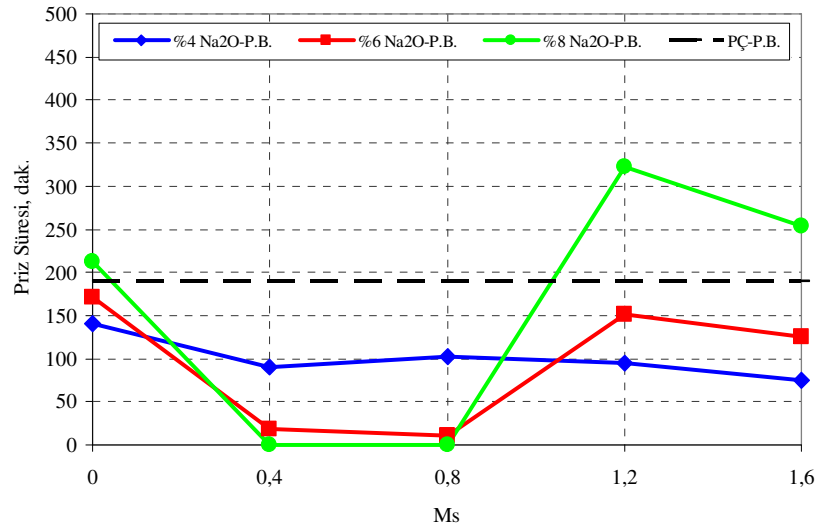
## 6.2 Priz Süresi

Alkalilerle aktive edilmiş hamurların ve PÇ hamurlarının priz süreleri 0,33 su/bağlayıcı oranında belirlenmiştir. Bu su/bağlayıcı oranı, PÇ hamurlarının normal kıvama getirilmesi için gerekli su miktarından yola çıkılarak tespit edilmiştir. PÇ hamuru için standart kıvam 6 mm, priz başlangıcı 189 dakika, priz sonu 265 dakika olarak bulunmuştur. Alkalilerle aktive edilmiş hamurların standart kıvam değeri, priz başlangıcı ve priz sonu değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

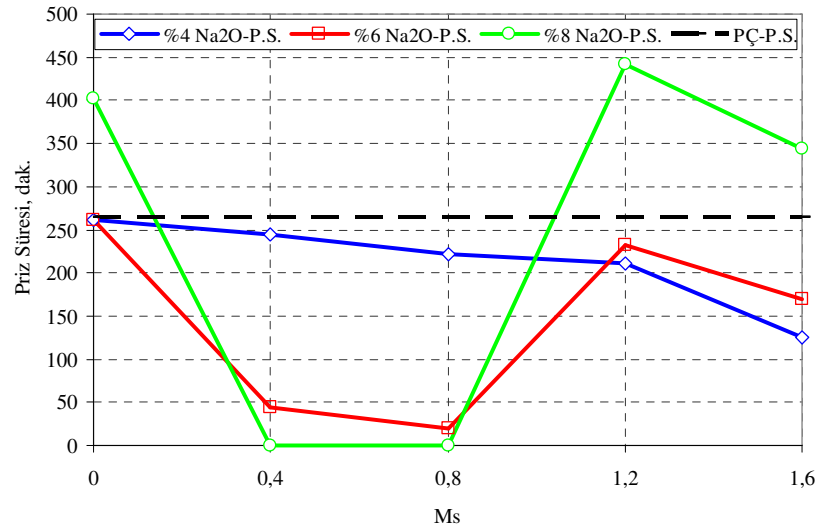
Tablo 6.2 Hamurların standart kıvam, priz başlangıcı ve priz sonu değerleri

$Na_2O$ , %	$M_s$				
	0	0,4	0,8	1,2	1,6
<b>Standart kıvam, mm</b>					
4	3,0	7,0	1,0	1,0	1,0
6	2,0	1,5	31,5	1,0	1,0
8	1,0	20,0	20,0	0,5	0
<b>Priz başlangıcı, dak</b>					
4	141	90	102	95	75
6	172	18	10	152	125
8	212	2	2	322	254
<b>Priz sonu, dak</b>					
4	261	245	222	211	125
6	262	44	20	232	170
8	402	2	2	442	344

Şekil 6.2’de priz başlangıcının, Şekil 6.3’te ise priz sonunun aktivatör çözeltilisinin özelliklerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Yüzde 8 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub> değeri 0, 1,2 ve 1,6 olan karışımlar haricindeki tüm karışımların priz başlangıç ve priz sonu süresi PÇ hamurundan daha kısadır. Bununla birlikte, %6 Na<sub>2</sub>O ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub>=0,4 ve 0,8 için priz süresi oldukça kısadır. Bu karışımlar, hızlı priz sürelerine ihtiyaç duyulan işlerde, örneğin püskürtme beton uygulamalarında kullanılabilir. Diğer karışımlar ise normal inşaat işlerinde priz süresi bakımından kabul edilebilir düzeydedir. M<sub>s</sub>=0, M<sub>s</sub>=1,2 ve M<sub>s</sub>=1,6 için Na<sub>2</sub>O oranının artması priz sürelerinde artış sağlamıştır.



Şekil 6.2 Priz başlangıç süresinin M<sub>s</sub> ve Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.3 Priz sonu süresinin M<sub>s</sub> ve Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi.

### 6.3 Mekanik Özellikler

Karışımların mekanik özelliklerinin kür türüne göre değişimi aşağıda verilmiştir.

#### 6.3.1 Standart Su Kürü

Standart su kürü geçirmiş PÇ bağlayıcı harç örneklerinin 2, 7, 28 ve 90. günlerdeki basınç ve eğilme dayanımları Tablo 6.3'te, AAH'ın dayanımları ise Tablo 6.4'te verilmiştir. Yüzde 2 Na<sub>2</sub>O içeren harçların su içerisinde çözülerek dağıldığı görülmüştür. Bu nedenle, bu harçların dayanımı belirlenememiştir.

Tablo 6.3 Standart su kürü geçirmiş PÇ harçlarının basınç ve eğilme dayanımı

	2. gün	7. gün	28. gün	90. gün
Basınç dayanımı, MPa	39,7	47,7	55,1	61,7
Eğilme dayanımı, MPa	9,8	9,9	11,8	13,1

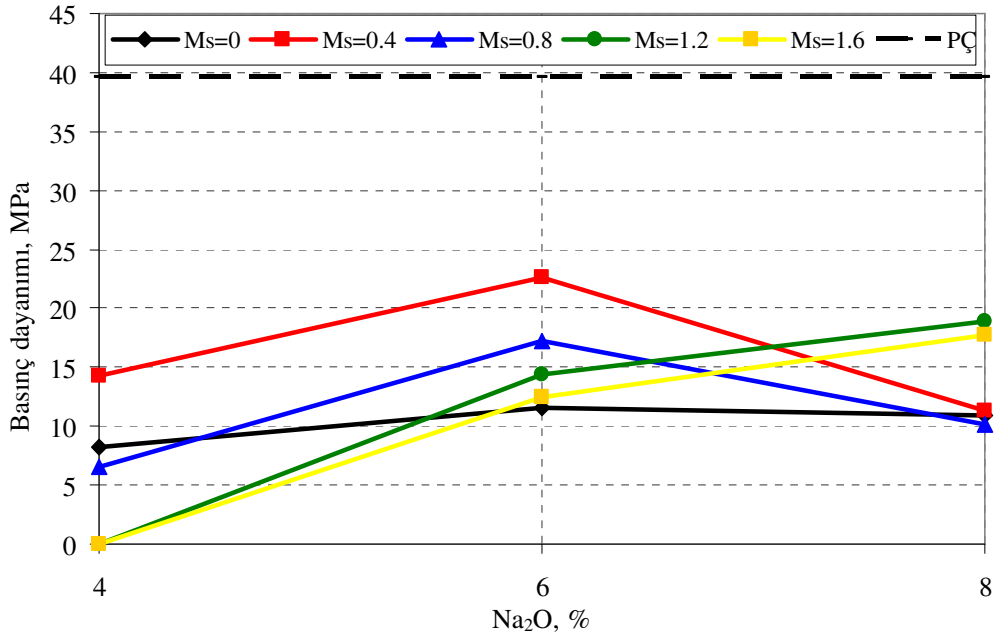
Tablo 6.4 Standart su kürü geçirmiş AAH'ın basınç ve eğilme dayanımı

M <sub>s</sub>	0	0,4	0,8	1,2	1,6	0	0,4	0,8	1,2	1,6	
Na <sub>2</sub> O, %	Basınç dayanımı (MPa)					Eğilme dayanımı (MPa)					
	2. gün										
4	8,2	14,3	6,5	0,0	0,0	4,0	2,5	1,3	0,0	0,0	
6	11,6	22,6	17,3	14,5	12,5	6,6	6,0	4,3	2,4	1,6	
8	10,9	11,3	10,1	18,9	17,7	5,6	2,2	2,2	2,9	2,9	
	7. gün										
4	14,3	38,4	35,5	8,6	4,3	6,8	7,8	5,2	2,8	1,1	
6	17,8	46,1	40,7	40,2	37,2	9,2	9,0	6,6	4,3	4,2	
8	18,5	34,7	43,9	52,6	44,9	8,4	6,8	5,7	4,8	4,4	
	28. gün										
4	21,3	54,7	59,7	58,5	52,3	8,6	11,3	12,5	7,9	8,5	
6	24,6	62,4	78,4	74,1	71,0	10,1	11,4	11,3	10,8	9,9	
8	25,3	48,3	70,3	81,7	74,1	11,0	8,3	8,2	10,0	8,5	
	90. gün										
4	26,2	61,3	84,0	67,8	57,3	7,8	10,5	12,5	11,9	9,9	
6	31,6	75,2	76,1	87,2	88,3	8,8	11,8	12,7	13,4	10,5	
8	37,3	60,6	63,0	94,8	99,0	11,1	9,9	12,1	11,6	10,6	

Şekil 6.4'te 2 günlük basınç dayanımının Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Düşük M<sub>s</sub> oranlarında maksimum basınç dayanımı %6 Na<sub>2</sub>O oranında

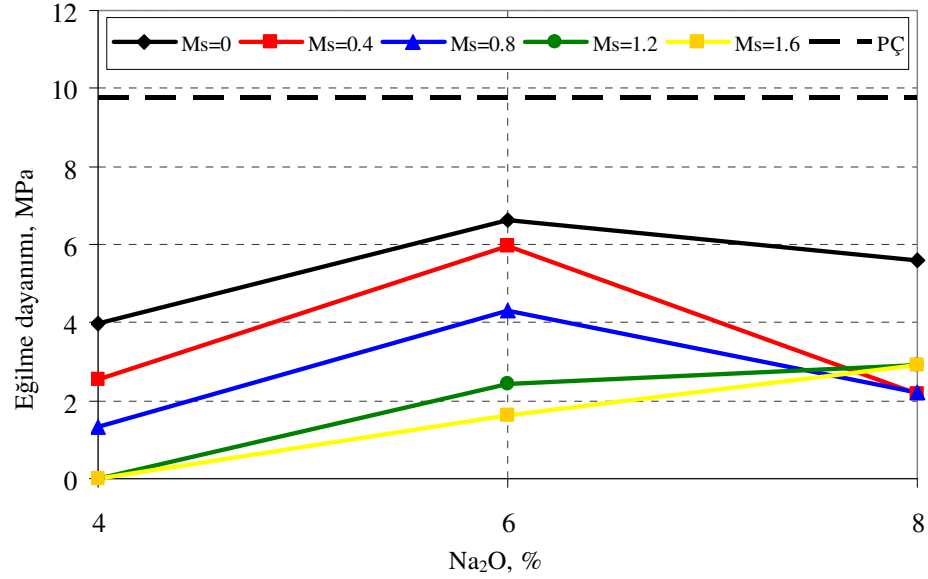


elde edilmişken, yüksek  $M_s$  oranlarında  $Na_2O$  oranının artması erken dayanımı sürekli olarak arttırmıştır. Sabit  $Na_2O$  oranında  $M_s$  değerine bağlı olarak basınç dayanımının değişimi incelendiğinde, %4 ve %6  $Na_2O$  oranlarında maksimum basınç dayanımı  $M_s=0,4$  değeri için elde edilmişken, %8  $Na_2O$  oranında en yüksek basınç dayanımı  $M_s$  değeri 1,2 olduğunda elde edilmiştir. Bununla birlikte, erken dayanım açısından elde edilen basınç dayanımlarının PÇ harçlarına kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir.



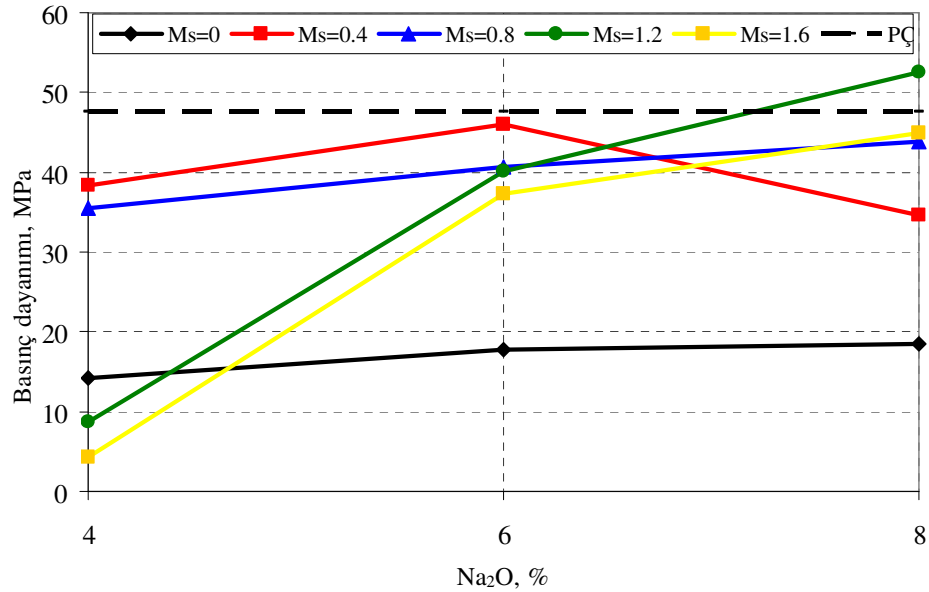
Şekil 6.4 2 gün süreyle standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç dayanımının değişimi.

Şekil 6.5'te 2 günlük eğilme dayanımının  $Na_2O$  ve  $M_s$  değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Yüzde 4 ve %6  $Na_2O$  oranlarında  $M_s$  değerinin artması dayanımda azalma ile sonuçlanırken, %8  $Na_2O$  oranında eğilme dayanımında  $M_s=0,8$  değerinden sonra küçüğe olsa bir artış olduğu görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı tüm  $Na_2O$  oranlarında  $M_s=0$  için elde edilmiştir.



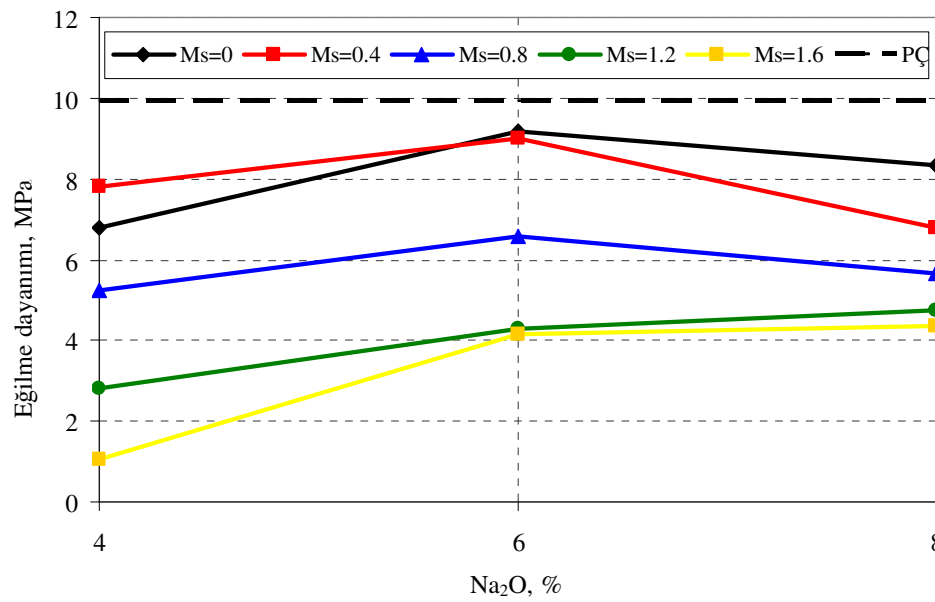
Şekil 6.5 2 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımının değişimi.

Şekil 6.6'da 7 gün standart su kürüne maruz bırakılmış harçların basınç dayanımının değişimi verilmiştir. Basınç dayanımı Na<sub>2</sub>O oranının artışı ile artmıştır. Bu artış, M<sub>s</sub> değerinin artması ile daha çarpıcı bir hal almıştır. M<sub>s</sub> 0,4 için %8 Na<sub>2</sub>O oranında dayanımda oluşan azalma, yetersiz işlenebilirlikten kaynaklanmaktadır. Maksimum basınç dayanımı, 2. günde olduğu gibi, %4 ve %6 Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub>=0,4 değeri için, %8 Na<sub>2</sub>O oranında ise M<sub>s</sub>=1,2 değeri için elde edilmiştir.



Şekil 6.6 7 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç dayanımının değişimi.

Şekil 6.7’de 7 günlük eğilme dayanımının  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s$  değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Yüzde 4  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında  $M_s=0,4$  için  $M_s=0$ ’a kıyasla daha yüksek bir eğilme dayanımı elde edilmiştir. Yüzde 6  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında ise,  $M_s=0$  ve  $M_s=0,4$  için yaklaşık aynı eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bununla birlikte genel eğilim,  $M_s$  değerindeki artış ile eğilme dayanımında azalmadır. En yüksek eğilme dayanımı, 0,8 ve daha düşük  $M_s$  değerlerinde %6  $\text{Na}_2\text{O}$  oranında elde edilmiştir. Daha yüksek  $M_s$  değerlerinde ise  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artışı eğilme dayanımında artışla sonuçlanmıştır.

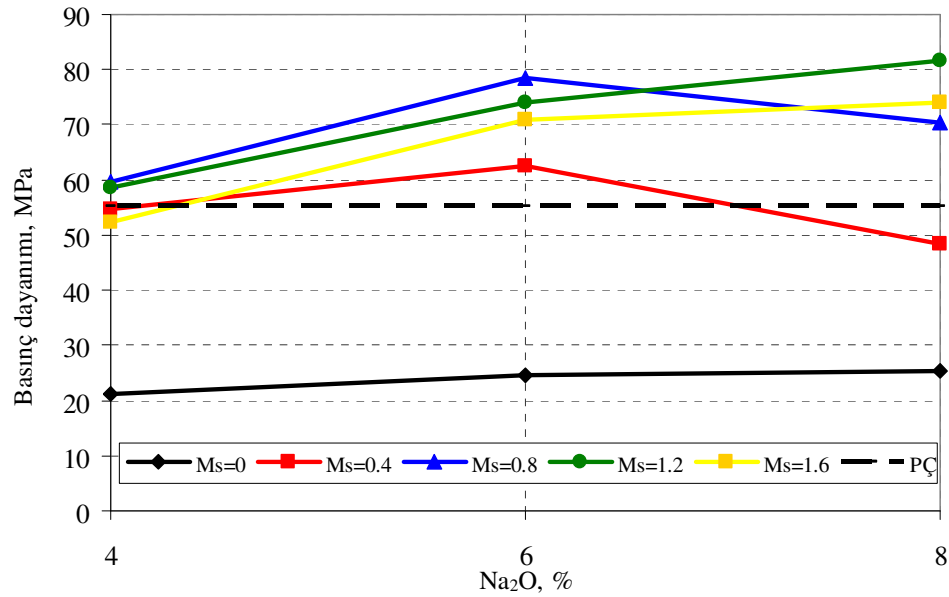


Şekil 6.7 7 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımının değişimi.

Eğilme ve basınç dayanımları karşılandığında oldukça ilginç bir durumun ortaya çıktığı görülmektedir. Örneğin, %6 oranında  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren seri için,  $M_s=0$  iken 7 günlük basınç dayanımının yaklaşık 18 MPa, eğilme dayanımının ise 9,2 MPa olduğu görülmektedir.  $M_s=0,4$  için ise, basınç dayanımının 46 MPa, eğilme dayanımının ise 9 MPa olduğu görülmektedir. Bir başka deyiş ile  $M_s=0,4$  karışımının basınç dayanımı  $M_s=0$  karışımına kıyasla 2,6 kat daha fazla olmasına rağmen eğilme dayanımı bir miktar daha düşüktür.

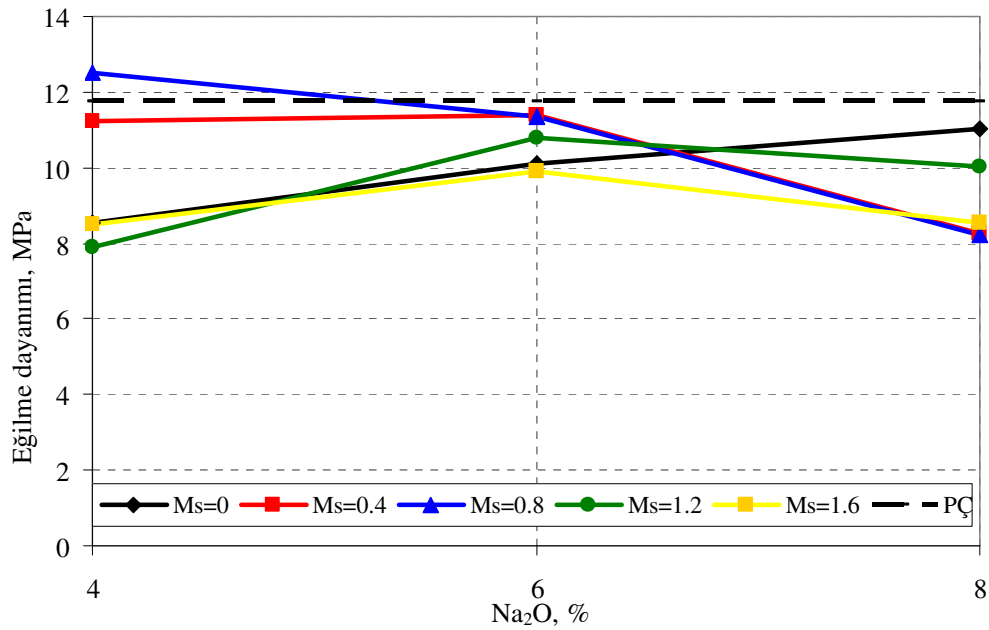
Şekil 6.8’de 28 gün süreyle standart su kürüne maruz bırakılmış harç numunelerinin basınç dayanımının değişimi verilmiştir.  $\text{Na}_2\text{O}$  oranının artışı  $M_s=0,4$

ve  $M_s=0,8$  haricinde basınç dayanımının artışıyla sonuçlanmıştır. Bu oranlar için %8  $Na_2O$  oranında dayanımda oluşan azalma, daha önce de belirtildiği gibi, yetersiz işlenebilirlikten kaynaklanmaktadır. Maksimum basınç dayanımı %4 ve %6  $Na_2O$  oranlarında, 2 ve 7. günden farklı olarak,  $M_s=0,8$  değerinde elde edilmiştir. Yüzde 8  $Na_2O$  oranında ise erken yaşlarda olduğu gibi  $M_s=1,2$  değerinde elde edilmiştir. Ayrıca,  $M_s$  değeri sıfır olan karışımlar haricinde hemen hemen tüm AAH'ların dayanımı bağlayıcısı çimento olan harcın dayanımını aşmıştır.



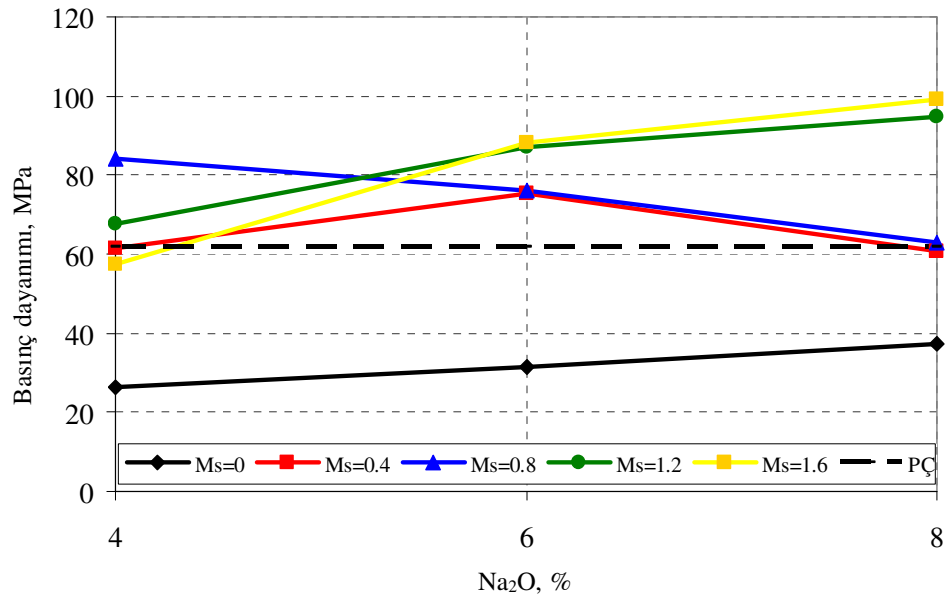
Şekil 6.8 28 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç dayanımının değişimi.

Şekil 6.9'da 28 günlük eğilme dayanımının  $Na_2O$  ve  $M_s$  değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Yüzde 4  $Na_2O$  oranında en yüksek eğilme dayanımı  $M_s=0,8$  için elde edilmiştir. Yüzde 6  $Na_2O$  oranında,  $M_s=0,4$  ve  $M_s=0,8$  için yaklaşık aynı eğilme dayanımı elde edilmiştir. Yüzde 8  $Na_2O$  oranında ise, en yüksek eğilme dayanımı  $M_s=0$  için elde edilmiştir.



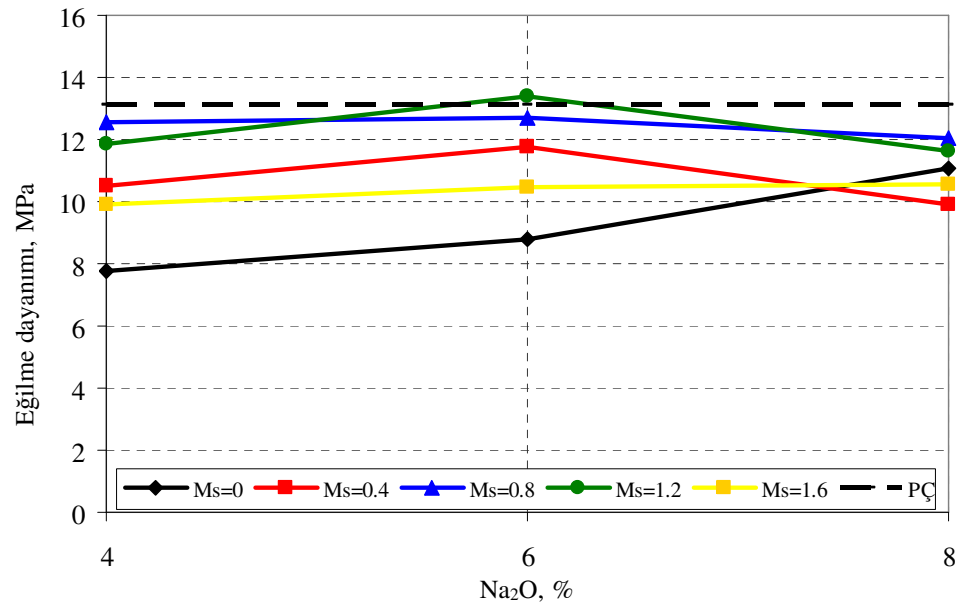
Şekil 6.9 28 gün süreyle standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımının değişimi.

Şekil 6.10'da 90 gün süreyle standart su kürüne maruz bırakılmış harç numunelerinin basınç dayanımının değişimi verilmiştir. Na<sub>2</sub>O oranının artışı M<sub>s</sub>=0,4 ve M<sub>s</sub>=0,8 haricinde basınç dayanımının artışıyla sonuçlanmıştır. Bu oranlar için %8 Na<sub>2</sub>O oranında dayanımda oluşan azalma, daha önce de belirtildiği gibi, yetersiz işlenebilirlikten kaynaklanmaktadır. Maksimum basınç dayanımı %4 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub>=0,8 değerinde elde edilmişken, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub>=1,2 ve 1,6 değerlerinde elde edilmiştir.



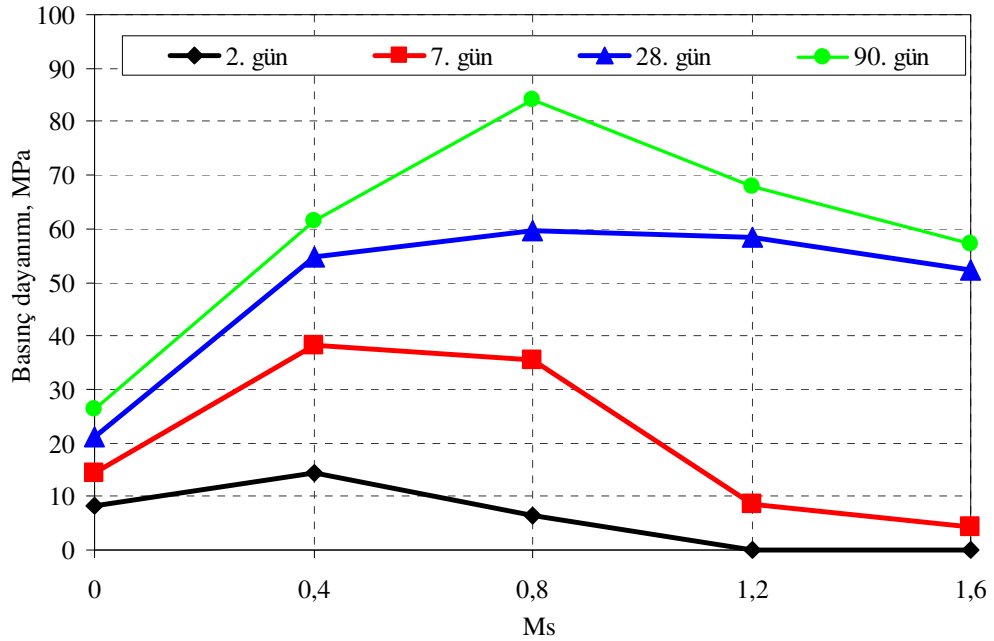
Şekil 6.10 90 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç dayanımının değişimi.

Şekil 6.11’de 90 günlük eğilme dayanımının Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub> değerine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Hidratasyonun ilerlemesi ile en yüksek dayanımın elde edildiği M<sub>s</sub> oranındaki artışlar dikkati çekmektedir. Bu durum, M<sub>s</sub> oranındaki artışın ilerleyen yaşlardaki eğilme dayanımı performansını daha fazla etkilediğini göstermektedir.

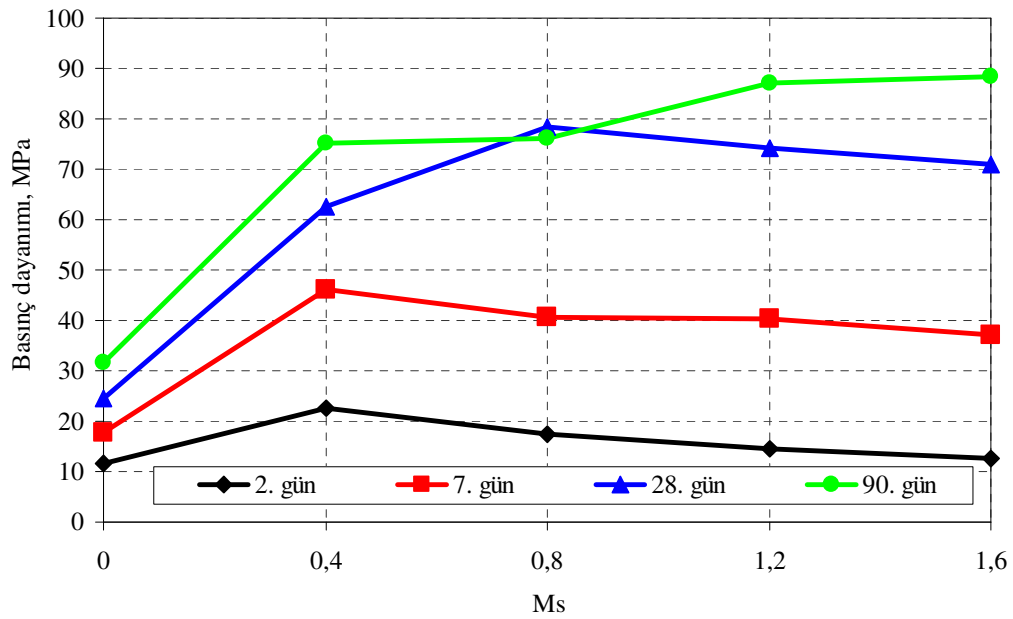


Şekil 6.11 90 gün standart su kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımının değişimi.

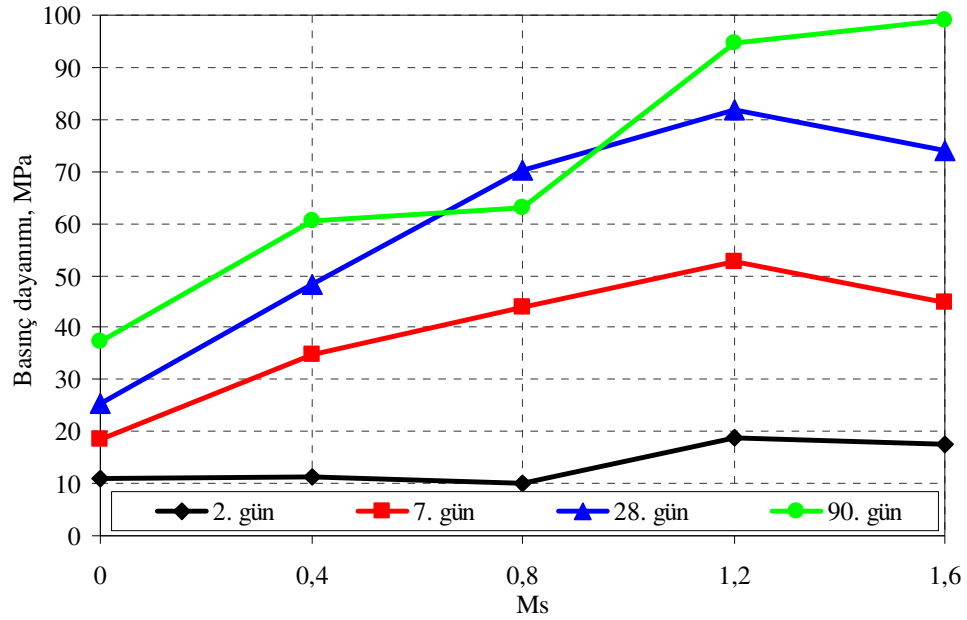
Şekil 6.12-6.14 arasında, %4, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub> oranına bağlı olarak zamanla basınç dayanımının değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, en büyük basınç dayanımının elde edildiği M<sub>s</sub> değeri ilerleyen yaşlarda daha yüksek değerlere ötelenmektedir.



Şekil 6.12 %4 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak basınç dayanımının değişimi.

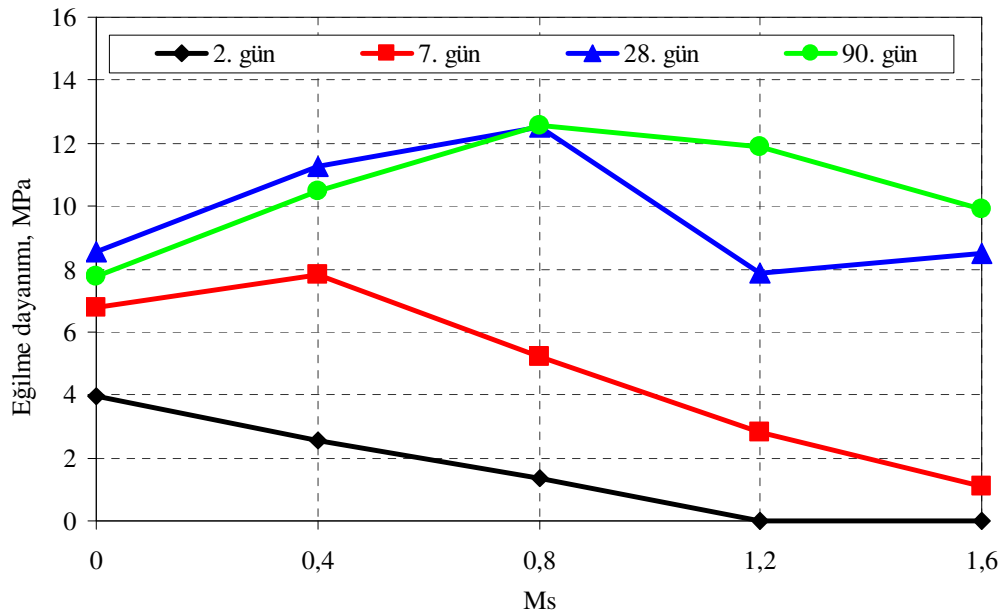


Şekil 6.13 %6 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak basınç dayanımının değişimi.



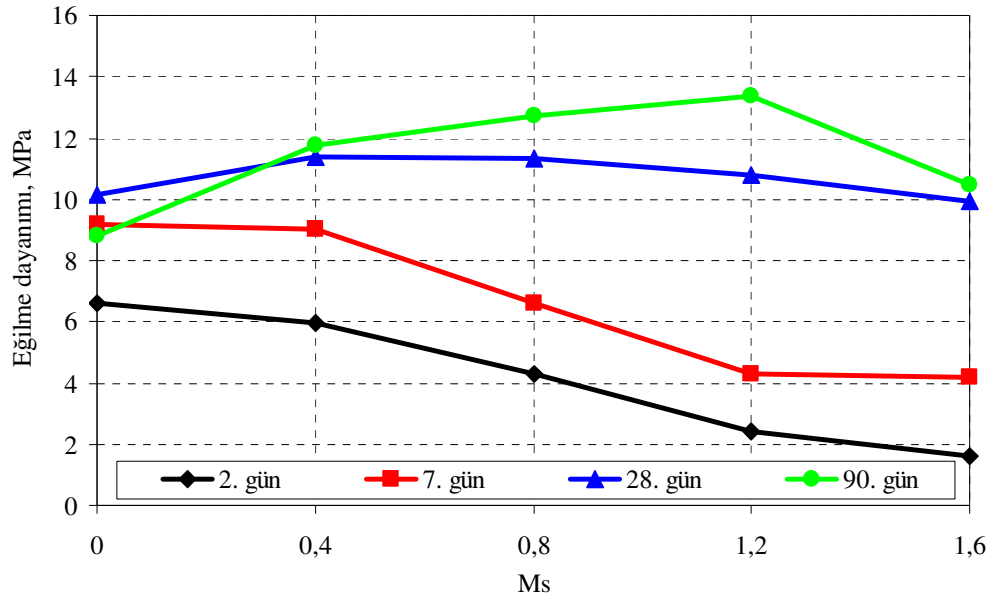
Şekil 6.14 %8 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak basınç dayanımının değişimi.

Şekil 6.15-6.17 arasında, %4, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub> oranına bağlı olarak zamanla eğilme dayanımının değişimi verilmiştir. Basınç dayanımına benzer şekilde maksimum eğilme dayanımının elde edildiği M<sub>s</sub> değerinin ilerleyen yaşlarda daha yüksek M<sub>s</sub> değerlerine çıktığı görülmektedir.

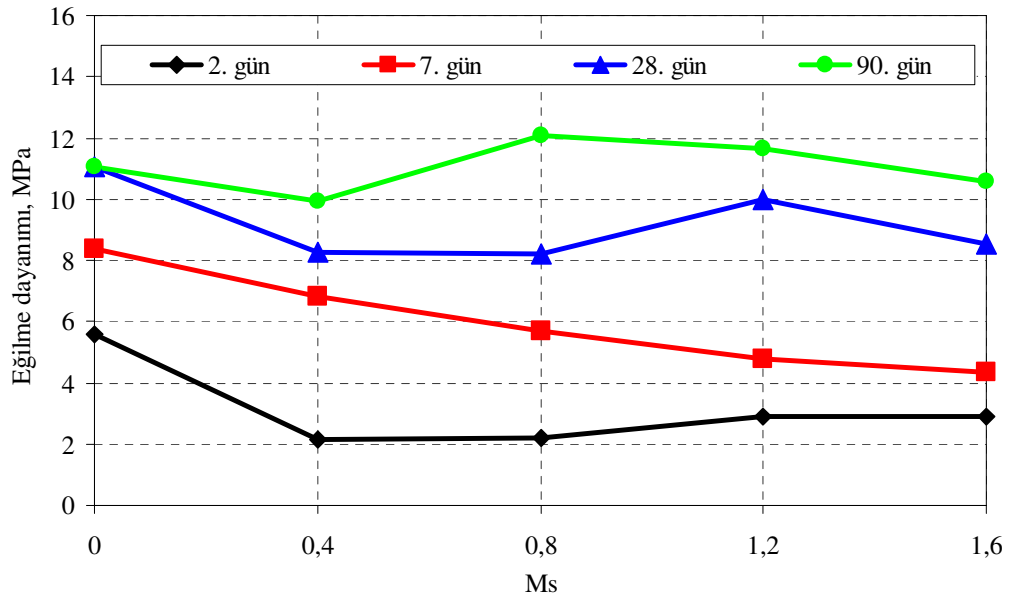


Şekil 6.15 %4 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak eğilme dayanımının değişimi.





Şekil 6.16 %6 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak eğilme dayanımının değişimi.



Şekil 6.17 %8 Na<sub>2</sub>O içeren harç örneklerinin zamana bağlı olarak eğilme dayanımının değişimi.

Zamana bağlı olarak en yüksek basınç dayanımının elde edildiği  $M_s$  değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, düşük ve orta düzeyde Na<sub>2</sub>O oranlarında (%4 ve %6) erken yaşlarda en yüksek dayanım düşük  $M_s$  oranlarında elde edilirken, %8 Na<sub>2</sub>O oranında en yüksek dayanım erken yaşlarda da nispeten yüksek  $M_s$

oranlarında elde edilmiştir. Burada, %8 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub>=0,4 ve 0,8 karışımlarının yetersiz işlenebilirliği de büyük rol oynamaktadır. Fakat hidrasyonun ilerleyen zamanlarında en yüksek dayanımın elde edildiği M<sub>s</sub> değerinin arttığı görülmektedir. Bir başka deyişle, çözültiden gelen SiO<sub>2</sub> miktarı arttıkça ilerleyen yaşarda daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Bu durum, ilk zamanlarda oluşan C-S-H yapı içerisine ortamdaki mevcut silisin tamamının dahil olmadığına işaret etmektedir. Zamanla reaksiyona girmeyen silisin C-S-H yapı içerisine dahil olarak dayanımı arttırdığı düşünülmektedir. Bu yolla, C-S-H'nin Ca/Si oranının azaldığı ve C-S-H'nin bağlayıcılığının arttığı düşünülmektedir.

Tablo 6.5 Zamana bağlı olarak en yüksek basınç dayanımının elde edildiği M<sub>s</sub> değeri

	<b>2. gün</b>	<b>7. gün</b>	<b>28. gün</b>	<b>90. gün</b>
<b>%4 Na<sub>2</sub>O</b>	0,4	0,4	0,8	0,8
<b>%6 Na<sub>2</sub>O</b>	0,4	0,4	0,8	1,6
<b>%8 Na<sub>2</sub>O</b>	1,2	1,2	1,2	1,6

Zamana bağlı olarak en yüksek eğilme dayanımının elde edildiği M<sub>s</sub> değerleri Tablo 6.6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, erken yaşlarda en yüksek dayanım M<sub>s</sub> değeri sıfır iken elde edilirken, ilerleyen yaşlarda M<sub>s</sub> değerindeki artış eğilme dayanımına katkı sağlamıştır. Gerek erken gerekse ilerleyen yaşlarda en yüksek dayanımın elde edildiği M<sub>s</sub> değerinin basınç dayanımına kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak, ilerleyen yaşlarda M<sub>s</sub> oranındaki artıştan kaynaklanan dayanım artışı burada da açıkça görülmektedir.

Tablo 6.6 Zamana bağlı olarak en yüksek eğilme dayanımının elde edildiği M<sub>s</sub> değeri

	<b>2. gün</b>	<b>7. gün</b>	<b>28. gün</b>	<b>90. gün</b>
<b>%4 Na<sub>2</sub>O</b>	0	0,4	0,8	0,8
<b>%6 Na<sub>2</sub>O</b>	0	0	0,4	1,2
<b>%8 Na<sub>2</sub>O</b>	0	0	0	0,8

### 6.3.2 Buhar Kürü

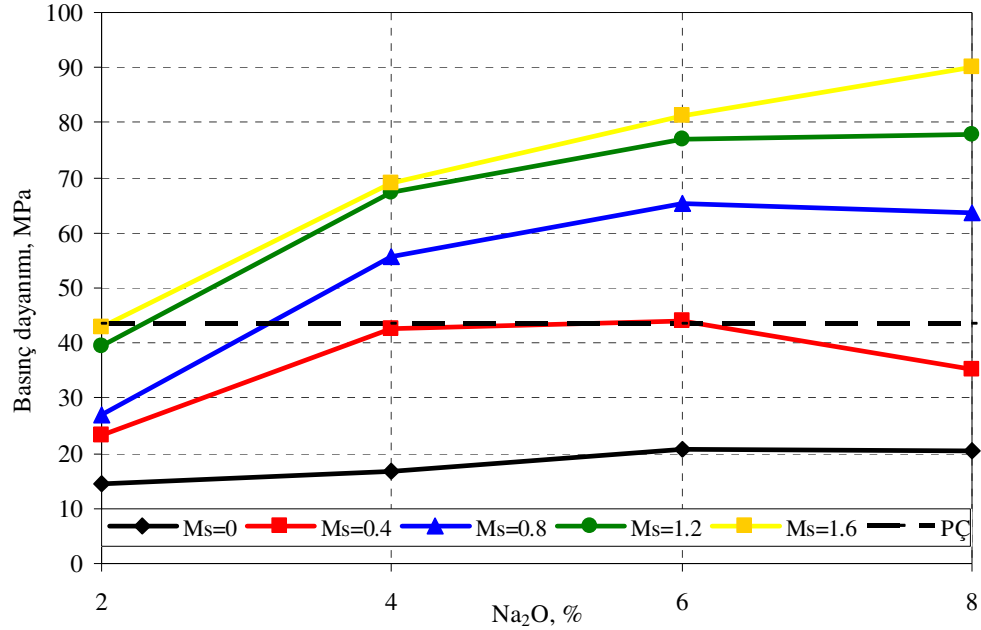
Buhar kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımları Tablo 6.7'de verilmiştir. Buhar kürü geçirmiş PÇ harçlarının basınç ve eğilme dayanımları ise sırasıyla 43,3 MPa ve 9,5 MPa'dır.

Tablo 6.7 Buhar kürü geçirmiş örneklerin basınç ve eğilme dayanımı

$M_s$	0	0,4	0,8	1,2	1,6	0	0,4	0,8	1,2	1,6
$Na_2O$ (%)	Basınç dayanımı (MPa)					Eğilme dayanımı (MPa)				
2	14,6	23,2	27,0	39,5	42,8	4,5	6,0	5,2	8,9	8,5
4	16,6	42,5	55,7	67,2	69,1	5,3	10,5	11,6	12,1	10,8
6	20,8	44,1	65,3	76,9	81,2	6,4	8,0	11,9	11,0	10,7
8	20,5	35,3	63,8	77,9	90,2	7,1	8,7	11,0	10,4	12,0

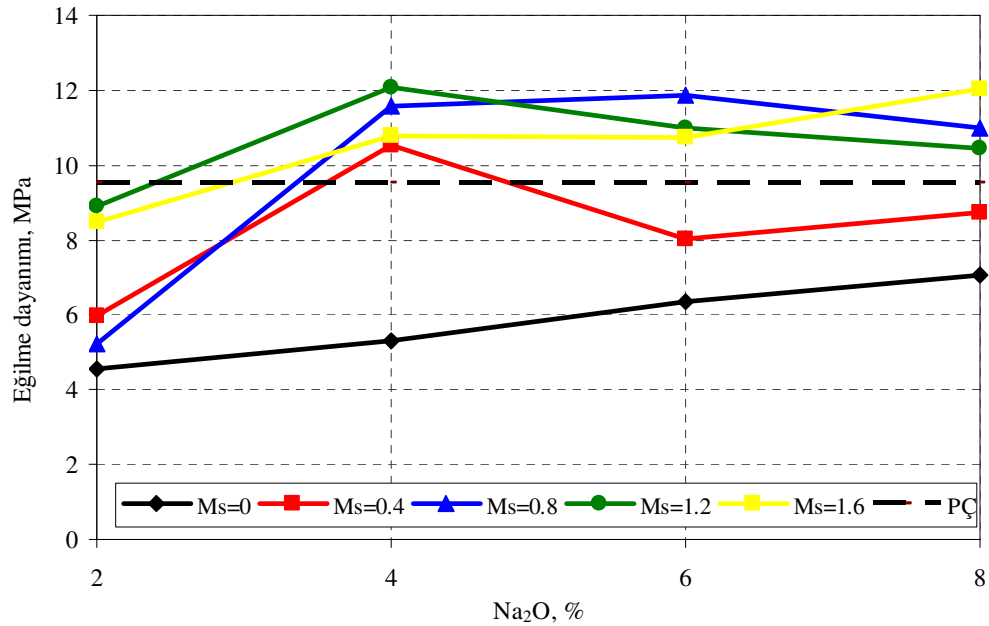
Şekil 6.18’de buhar kürü geçirmiş örneklerin basınç dayanımının  $Na_2O$  ve  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekilden de g r ld ği gibi,  $Na_2O$  oranının ve  $M_s$  değerinin artışı ile basınç dayanımları belirgin bir Şekilde artmıştır. Bu artışlar yüksek  $Na_2O$  oranlarında ve yüksek  $M_s$  değerlerinde daha çarpıcı bir hal almıştır. Bir başka deyiş ile, yüksek  $Na_2O$  oranlarında  $M_s$  değerindeki artışın basınç dayanımı üzerindeki etkisi d ŐiŐ  $Na_2O$  oranlarındakine kıyasla çok daha fazladır. Örneğin, %2  $Na_2O$  oranında  $M_s$  değerinin 0’dan 1,6’ya yükselmesi, dayanımda %193 artış sağlarken, %8  $Na_2O$  oranında bu artış %340’tır. Benzer Şekilde, yüksek  $M_s$  oranlarında  $Na_2O$  oranının artışının basınç dayanımı üzerindeki etkisi d ŐiŐ  $M_s$  oranlarındakine kıyasla daha fazladır. Örneğin,  $M_s=0$  iken  $Na_2O$  oranının %2’den %8’e çıkması dayanımda %40 artış yaratırken,  $M_s=1,6$  oranında bu artış %111 olarak bulunmuştur. Buradan ıkarılacak bir diğer sonuç,  $M_s$  oranındaki artışın buhar kürü geçirmiş numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin  $Na_2O$  oranındaki artışa kıyasla daha fazla olduğudur.

Yüzde 8  $Na_2O$  oranında  $M_s$  değeri 0,4 ve 0,8 iken elde edilen basınç dayanımlarının %6  $Na_2O$  oranındakine kıyasla daha d ŐiŐ olduğu görülmektedir. Bu durum, %8  $Na_2O$  oranında  $M_s=0,4$  ve 0,8 olduğunda ortaya çıkan d ŐiŐ işlenebilirlik nedeniyle örneğin yeteri kadar sıkıŐtırılmamıŐ olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.18 Buhar kürü geçirmiş AAH'ın basınç dayanımının Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.19'da buhar kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımının değişimi verilmiştir.  $M_s=0$  ve  $M_s=1,6$  için eğilme dayanımı Na<sub>2</sub>O oranının artmasıyla sürekli olarak artarken, diğer  $M_s$  oranlarında maksimum eğilme dayanımı %4 veya %6 Na<sub>2</sub>O oranlarında elde edilmiştir.



Şekil 6.19 Buhar kürü geçirmiş AAH'ın eğilme dayanımının Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi.

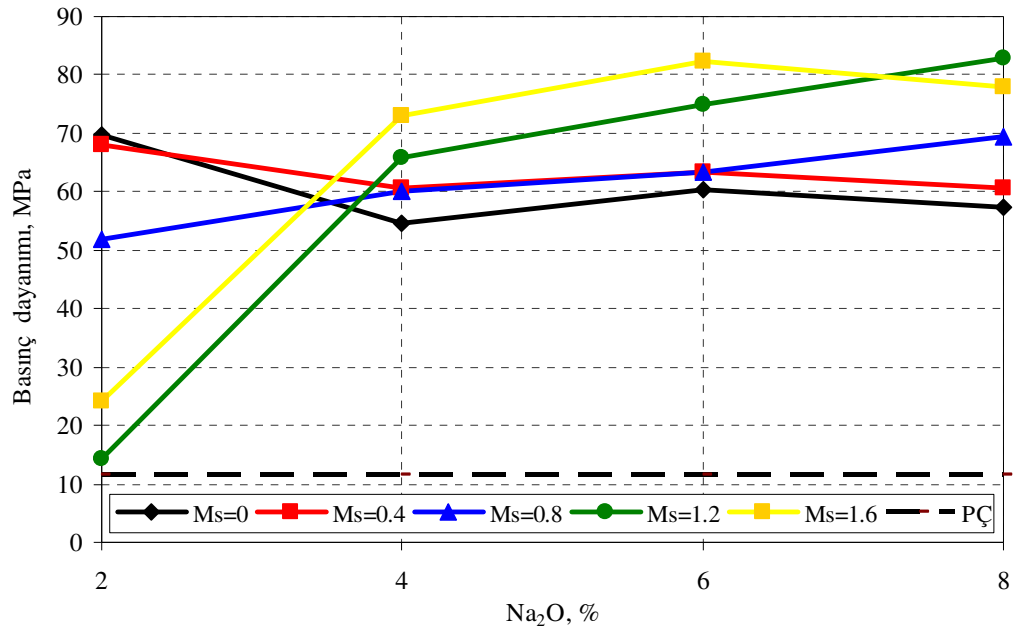
### 6.3.3 Otoklav Kürü

Otoklav kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç ve eğilme dayanımları Tablo 6.8’de verilmiştir. PÇ harçlarının otoklav kürü sonrası basınç ve eğilme dayanımları ise sırasıyla 11,5 MPa ve 2,9 MPa olarak bulunmuştur. PÇ harçlarının dayanım değerlerinin bu derece düşük olması; içeriğinde silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi silis içeren malzemeler bulunmamasından kaynaklanmaktadır. Karışımda silis içeriği yetersiz ise (molar CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 1,5 civarı) otoklav küründe gözenekli ve zayıf  $\alpha$ -C<sub>2</sub>SH oluşmakta ve dayanım azalmaktadır. Yeterli silis varlığında ise (molar CaO/SiO<sub>2</sub> oranı yaklaşık 1) güçlü tobermorit jeli oluşmaktadır (Khoury, 1992).

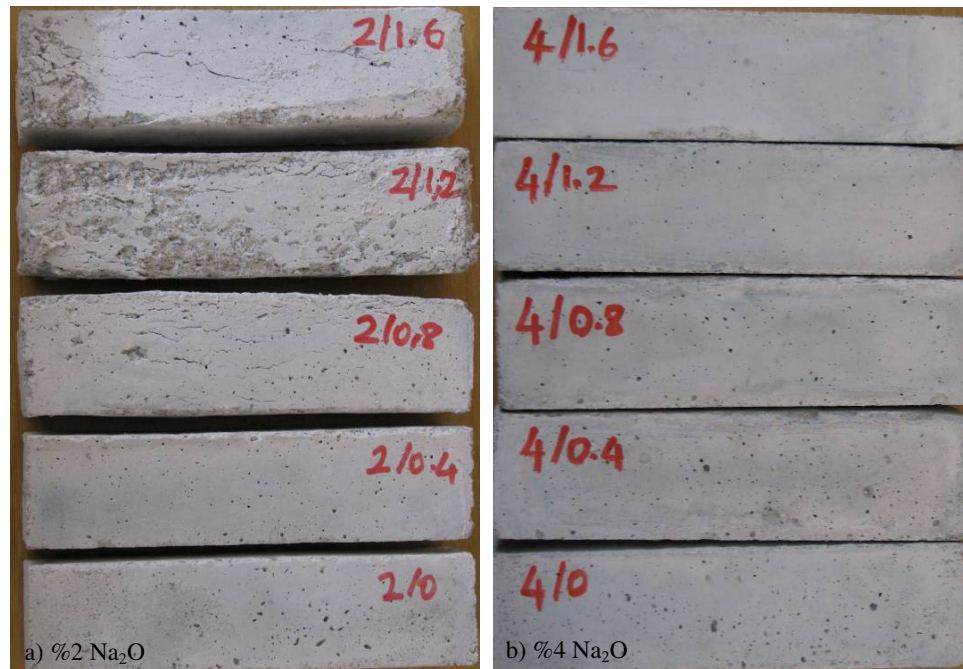
Tablo 6.8 Otoklav kürü geçirmiş örneklerin basınç ve eğilme dayanımı

M <sub>s</sub>	0	0,4	0,8	1,2	1,6	0	0,4	0,8	1,2	1,6
Na <sub>2</sub> O, %	Basınç dayanımı (MPa)					Eğilme dayanımı (MPa)				
2	69,7	67,9	51,9	14,3	24,1	12,5	12,1	9,6	2,8	4,2
4	54,7	60,7	60,2	65,7	72,9	10,2	11,3	12,1	13,6	11,4
6	60,4	63,3	63,4	74,9	82,2	8,7	9,8	10,4	9,5	8,8
8	57,5	60,6	69,4	82,8	77,9	8,0	8,5	9,3	9,5	9,5

Şekil 6.20’de basınç dayanımının M<sub>s</sub> ve Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil 6.20’den görüldüğü gibi, en yüksek basınç dayanımı M<sub>s</sub>=0 ve M<sub>s</sub>=0,4 için %2 Na<sub>2</sub>O oranında elde edilmişken, diğer M<sub>s</sub> oranlarında en yüksek dayanım %6 veya %8 Na<sub>2</sub>O oranında elde edilmiştir. Yüzde 2 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub> oranının artması basınç dayanımında azalmayla sonuçlanmıştır. Bu durum, 24 saatlik ön bekleme süresinin numunelerin dayanım kazanması için yeterli olmamasından ötürü (özellikle M<sub>s</sub>=1,2 ve 1,6 için) otoklav kürü esnasında çatlamasından kaynaklanmaktadır (Şekil 6.21). Ön bekleme süresi uzatılarak bu karışımlardan da yüksek dayanımlar elde edilebileceği görülmüştür. Örneğin, M<sub>s</sub>=1,2 karışımından yeterli ön bekleme süresi ile çatlama olmaksızın 76,4 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Diğer Na<sub>2</sub>O oranlarında M<sub>s</sub> değerinin artması dayanımların artmasıyla sonuçlanmıştır. Bununla birlikte, %8 Na<sub>2</sub>O oranında, M<sub>s</sub> 1,2 için elde edilen basınç dayanımı M<sub>s</sub> 1,6 için elde edilen dayanımdan daha yüksek bulunmuştur. AAH’ların tamamının basınç dayanımı PÇ harcından yüksektir.



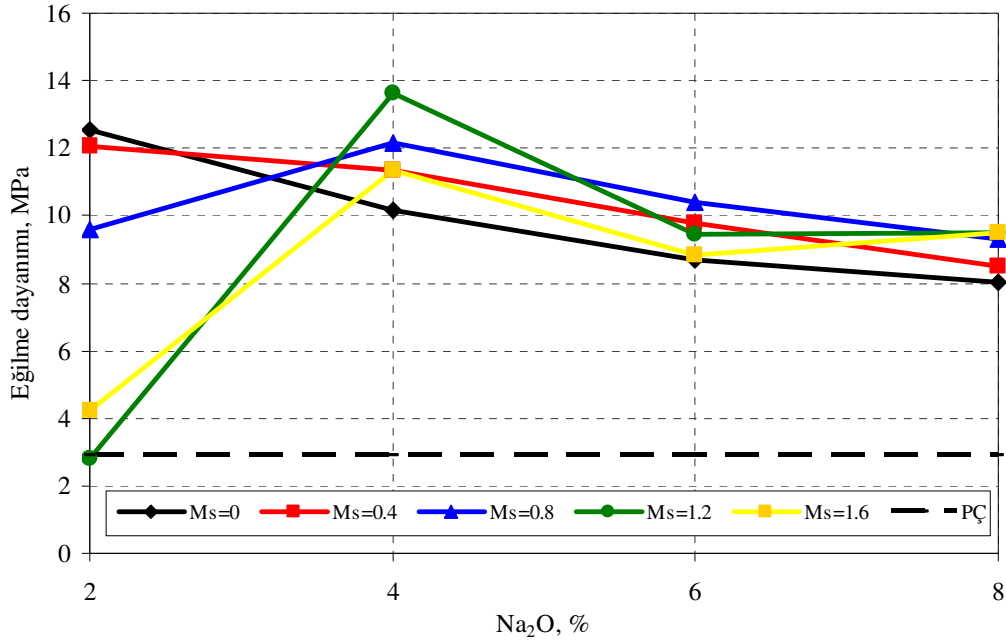
Şekil 6.20 Otoklav kürü geçirmiş AAH'nin basınç dayanımının Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi.



Şekil 6.21 Otoklav kürü %2 ve %4 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'nin deney sonrası görünümleri.

Şekil 6.22'de eğilme dayanımının  $M_s$  ve Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Eğilme dayanımları bakımından değerlendirildiğinde,  $M_s=0$  ve  $M_s=0,4$  değerleri için en yüksek eğilme dayanımı, basınç dayanımında olduğu gibi %2 Na<sub>2</sub>O

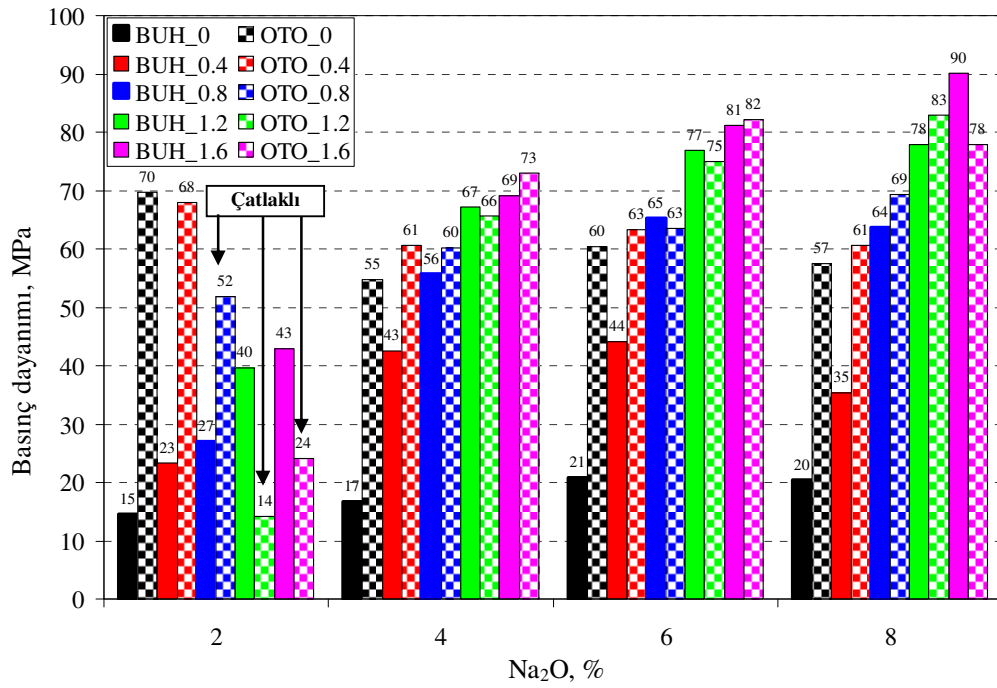
oranında elde edilmiştir. Diğer  $M_s$  oranlarında ise, en yüksek eğilme dayanımı değeri %4  $Na_2O$  oranında elde edilmiş olup,  $Na_2O$  oranının artması eğilme dayanımında azalmayla sonuçlanmıştır. En yüksek eğilme dayanımı değeri %2  $Na_2O$  için  $M_s=0$  değerinde, %4  $Na_2O$  için  $M_s=1,2$  değerinde, %6  $Na_2O$  için  $M_s=0,8$  değerinde ve %8  $Na_2O$  için %1,2 değerinde elde edilmiştir.



Şekil 6.22 Otoklav kürü geçirmiş AAH'n eğilme dayanımının  $Na_2O$  oranına bağlı olarak değişimi.

#### 6.3.4 Otoklav ve Buhar Kürünün Mekanik Özelliklere Etkisinin Kıyaslanması

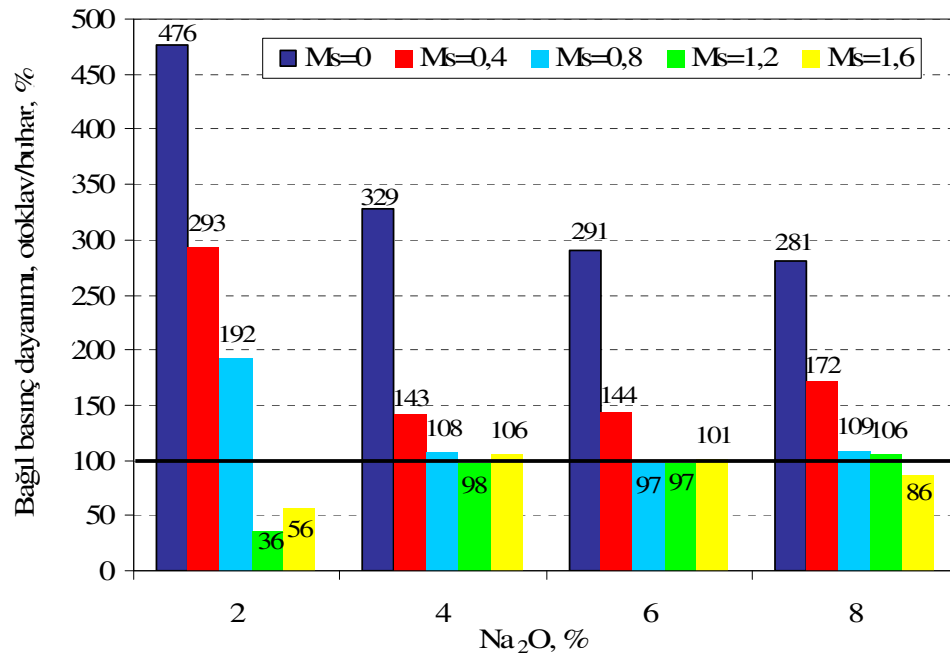
Buhar kürü ve otoklav kürünün basınç dayanımına etkisi Şekil 6.23'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Daha öncede belirtildiği gibi, %2  $Na_2O$  içeren  $M_s$  değeri 0,8, 1,2 ve 1,6 olan harç örnekleri otoklav çıkışında önemli derecede çatlaklı oldukları için dayanım değerleri oldukça düşük düzeyde bulunmuştur. Bu nedenle yapılacak değerlendirmede bu karışımların mekanik özelliklerinin dikkate alınması yanltıcı olacaktır.



Şekil 6.23 Buhar kürü ve otoklav kürünün AAH'ın basınç dayanımına etkisi.

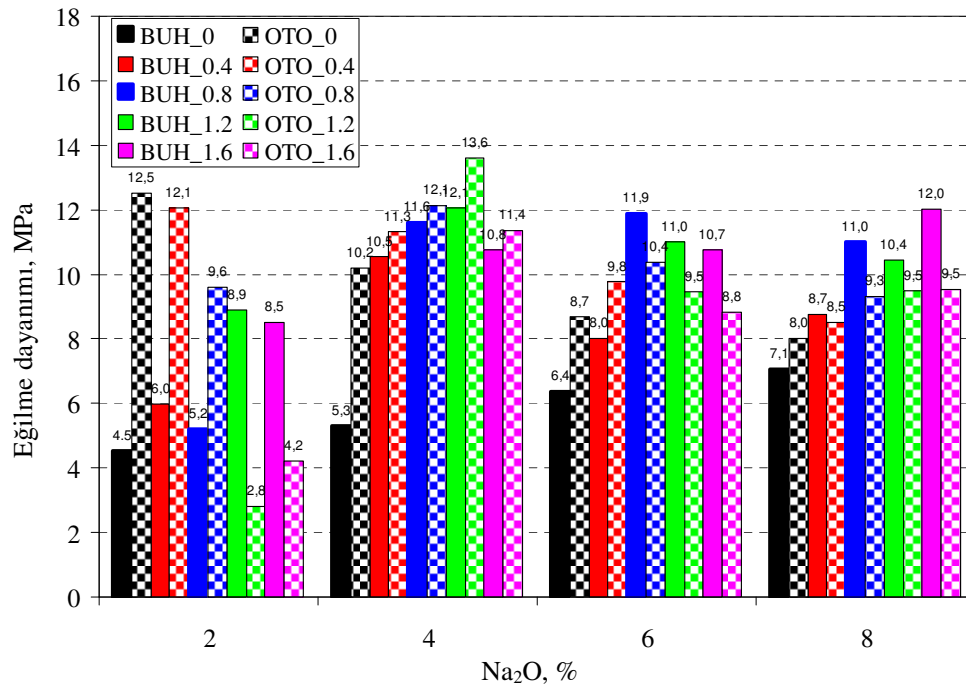
Şekil 6.24'te otoklav kürünün buhar kürüne kıyasla etkinliğinin ortaya konulması amacıyla otoklav sonrası basınç dayanımının buhar kürü sonrası basınç dayanımına yüzdece oranı verilmiştir. Görüldüğü gibi, düşük  $M_s$  oranlarında (0,4 ve özellikle 0) yüksek basınç dayanımı için otoklav kürü zorunludur. Ayrıca,  $Na_2O$  oranı azaldıkça otoklav kürünün buhar kürüne karşı üstünlüğü artmaktadır. Bununla birlikte, %4, %6 ve %8  $Na_2O$  oranlarında  $M_s$  değeri 0,8'in üzerine çıktığında, otoklav ve buhar kürüyle elde edilen dayanım değerleri yaklaşık aynı olmakta, hatta bazı durumlarda buhar kürüyle elde edilen basınç dayanımı değeri daha yüksek olmaktadır. Bir başka deyiş ile otoklav kürü yüksek  $Na_2O$  oranları ve yüksek  $M_s$  değeri durumunda gereksiz olmaktadır. Bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımında ise, otoklav kürü geçirmiş harç örneklerinin basınç dayanımı, buhar kürü geçirmiş harç örneklerinin dayanımının %26'sı olarak bulunmuştur.





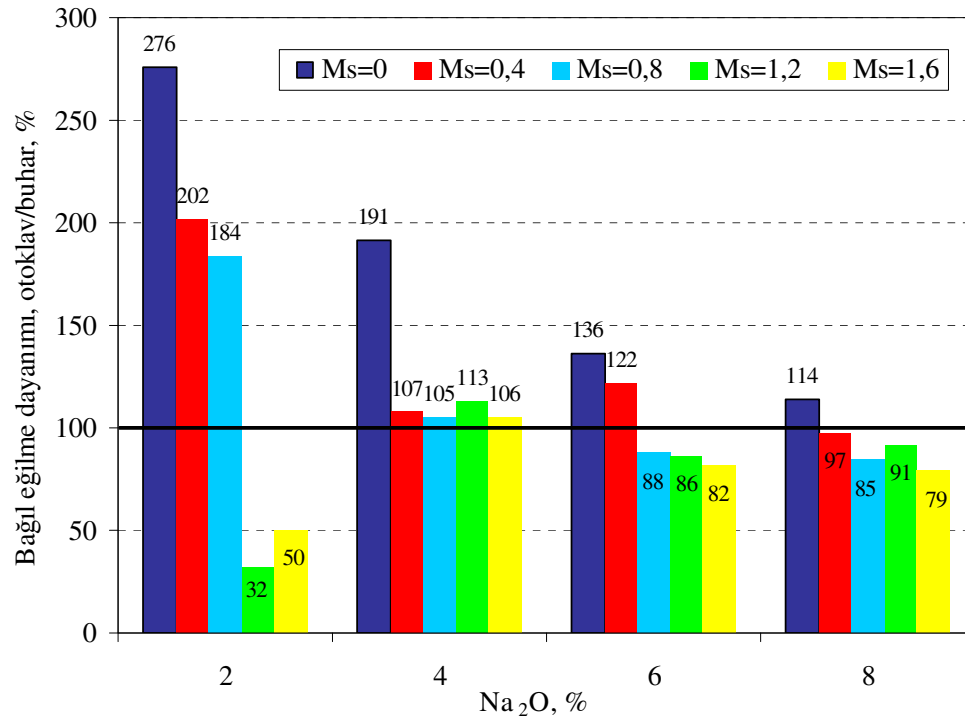
Şekil 6.24 Otoklav kürünün buhar kürüne kıyasla basınç dayanımı açısından etkinliği.

Şekil 6.25'te buhar ve otoklav kürü geçirmiş harç numunelerinin eğilme dayanımının değişimi verilmiştir.



Şekil 6.25 Buhar kürü ve otoklav kürünün AAH'ın eğilme dayanımına etkisi.

Şekil 6.26'da otoklav sonrası eğilme dayanımının buhar kürü sonrası eğilme dayanımına yüzdece oranı verilmiştir. Basınç dayanımı açısından bulunan ilişkiye benzer bir ilişki eğilme dayanımı için de elde edilmiştir. Yüzde 6 ve üzerindeki  $\text{Na}_2\text{O}$  oranlarında  $M_s$  değeri 0,8'den daha yüksek olduğunda buhar kürü geçirmiş harçların eğilme dayanımı otoklav kürü geçirmiş harçlara kıyasla daha yüksek olmaktadır. Şekil 6.24 ve 6.26 kıyaslandığında, otoklav kürünün buhar kürüne kıyasla basınç dayanımına olan katkısının eğilme dayanımına olan katkısından daha fazla olduğu görülmektedir. Bağlayıcısı PÇ olan harç karışımlarında, otoklav kürü geçirmiş harç örneklerinin eğilme dayanımı buhar kürü geçirmiş harç örneklerinin dayanımının %30'u olarak bulunmuştur.



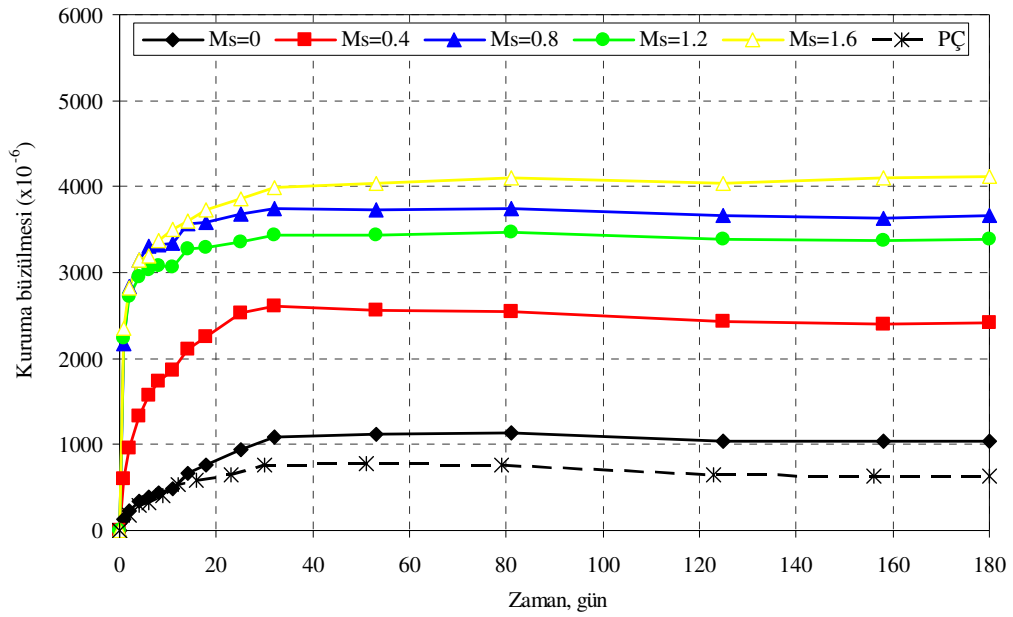
Şekil 6.26 Otoklav kürünün buhar kürüne kıyasla eğilme dayanımı açısından etkinliği.

Sonuç olarak, otoklav kürüyle çok düşük oranlarda aktivatör kullanarak dahi, çok yüksek dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Sodyum silikat kullanmadan aktivatör olarak sadece NaOH kullanılması durumunda, otoklav kürü performansı buhar kürüne kıyasla çok daha üstün olmaktadır. AAH'larının maliyetinde en önemli kalemlerden biri olan aktivatör miktarının azaltılması ekonomik ürünlerin üretimine olanak sağlayabilir. Bununla birlikte, otoklav kürünün buhar kürüne kıyasla hem

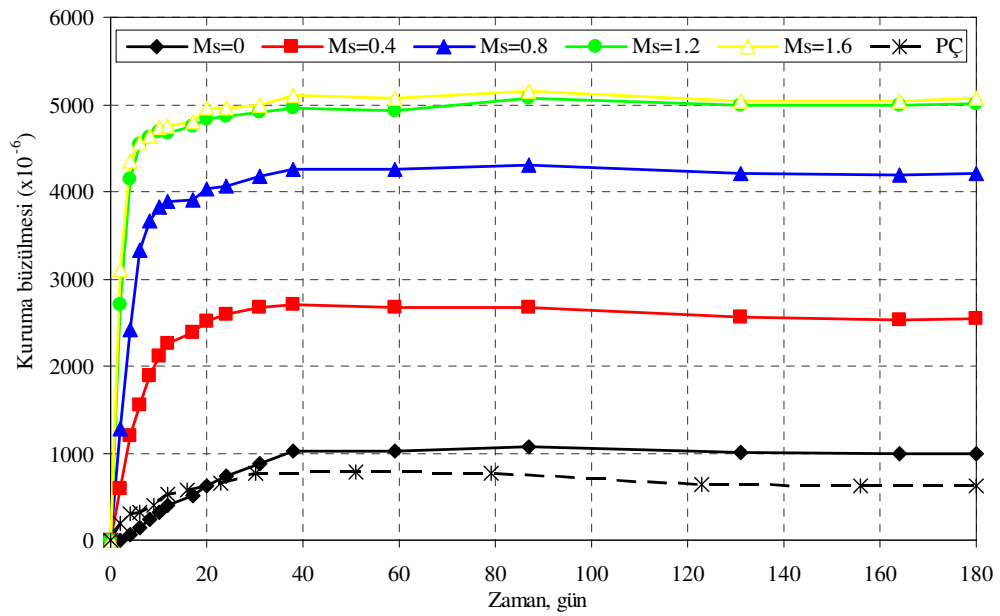
tesis ve işletme maliyeti hem de enerji giderleri bakımından daha masraflı olacağı unutulmamalıdır. Ancak ayrıntılı bir fizibilite etüdü sonrası hangi seçeneğin daha akılcı bir üretim şekli olacağı belirlenebilir.

#### **6.4 Kuruma Büzülmesi**

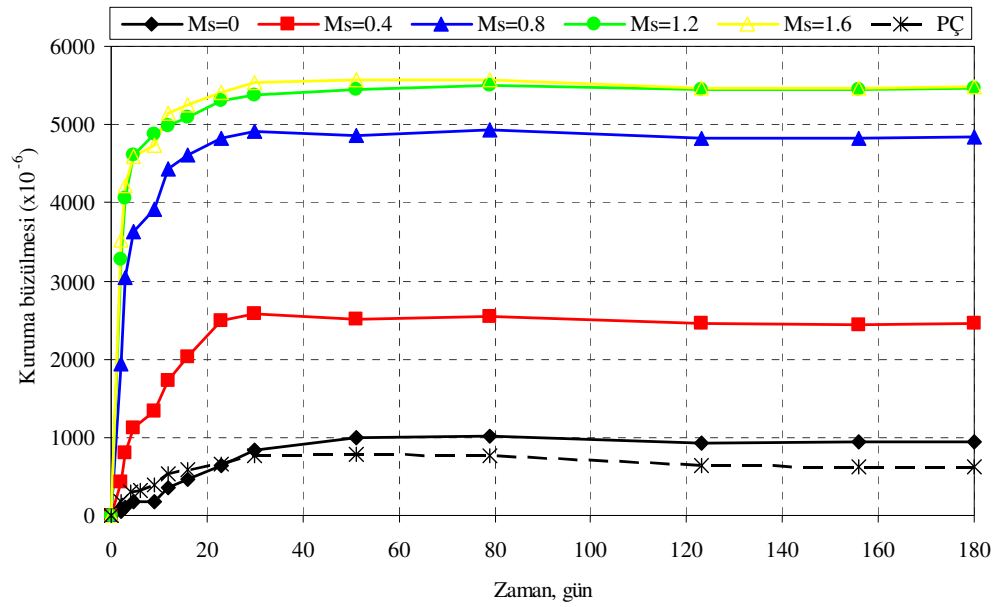
Laboratuvar koşullarında bekletilen numuneler için, %4, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında zamana bağlı olarak M<sub>s</sub> değeri ile kuruma büzülmesinin değişimi sırasıyla Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da verilmiştir. Bağlayıcısı PÇ olan kontrol karışımı ile kıyaslandığında, M<sub>s</sub> değeri 0 olan karışımların kuruma büzülmesi değerlerinin bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımlarına oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte M<sub>s</sub> değerinin artması ile kuruma büzülmesi değerlerinin de önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Silikat içeren aktivatör kullanımı durumunda kuruma büzülmesindeki artış birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. Bununla birlikte deney yapılan numunelerden hiçbirinde gözle görülebilir çatlak oluşmadığı belirtilmelidir. Wang, Scrivener ve Pratt (1994) cam suyu ile aktive edilmiş YFC betonlarının PÇ betonlarına kıyasla daha yüksek büzülme deformasyonlarını, hidrasyon esnasında silikaca zengin jel oluşumuna bağlamıştır. Collins ve Sanjayan (2000b) ise daha yüksek kuruma büzülmesini AA-YFC hamurlarında mezo boşlukların PÇ hamurlarına kıyasla daha yüksek oranda olmasına bağlamıştır. Wittmann (1982) ve Young (1988) da boşluk boyutu dağılımının ve C-S-H jelinin özelliklerinin kuruma büzülmesinin büyüklüğü üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 6.27 %4 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'ın zamana bağlı olarak boy değişimi.

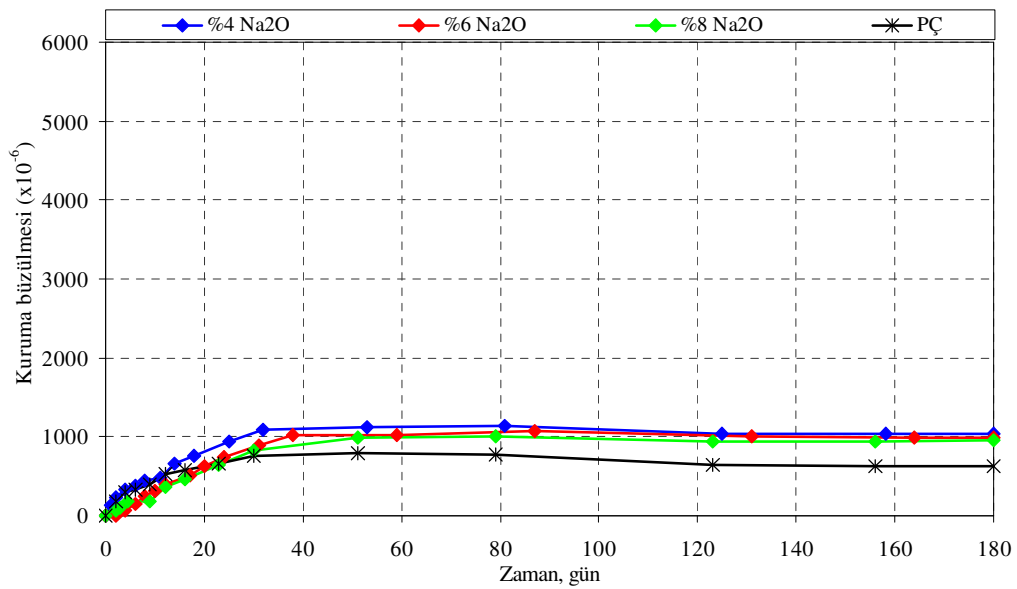


Şekil 6.28 %6 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'ın zamana bağlı olarak boy değişimi.

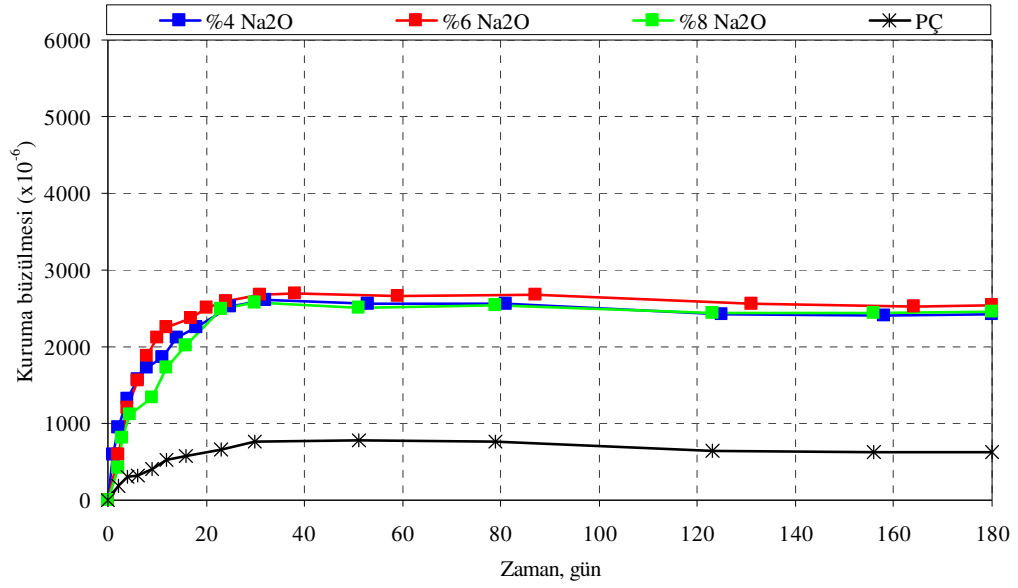


Şekil 6.29 %8 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'nın zamana bağlı olarak boy değişimi.

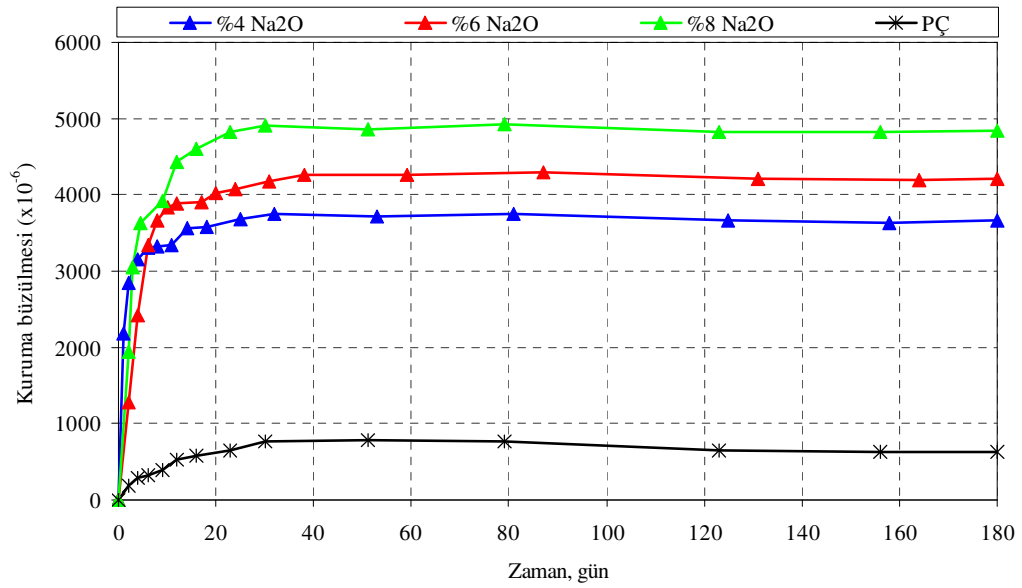
Şekil 6.30-6.34 arasında,  $M_s = 0, 0,4, 0,8, 1,2$  ve  $1,6$  için kuruma büzülmesinin zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir.  $M_s = 0$  ve  $0,4$  için Na<sub>2</sub>O oranının kuruma büzülmesi davranışı üzerinde herhangi bir etkisi yok iken,  $M_s$  değeri  $0,8$  ve üzerine çıktığında artan Na<sub>2</sub>O oranı ile kuruma büzülmesi değerleri de artmaktadır.



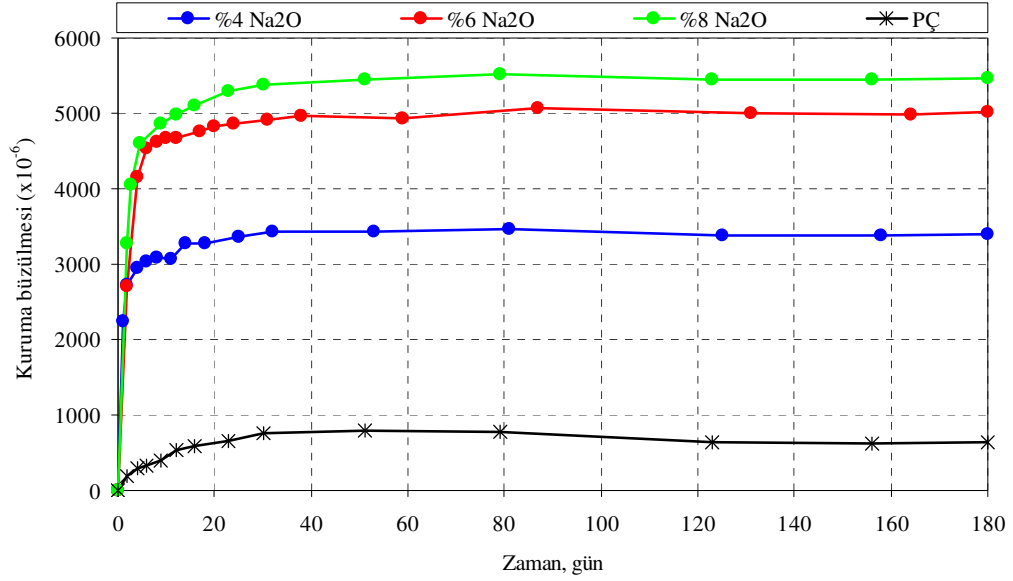
Şekil 6.30  $M_s=0$  için AAH'nın zamana bağlı olarak boy değişimi.



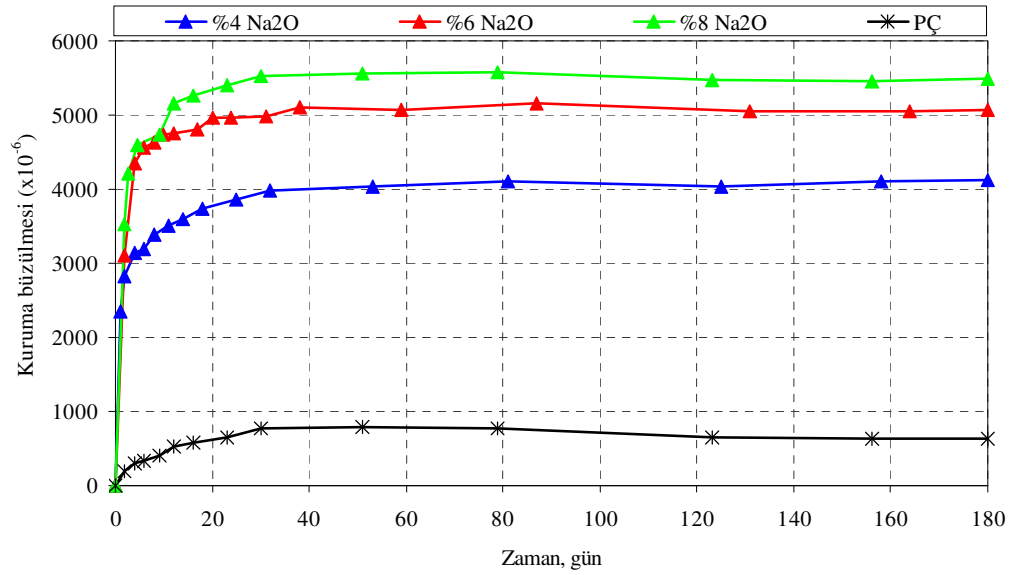
Şekil 6.31  $M_s=0,4$  için AAH'ın zamana bağlı olarak boy değişimi.



Şekil 6.32  $M_s=0,8$  için AAH'ın zamana bağlı olarak boy değişimi.



Şekil 6.33  $M_s=1,2$  için AAH'nin zamana bağlı olarak boy değişimi.

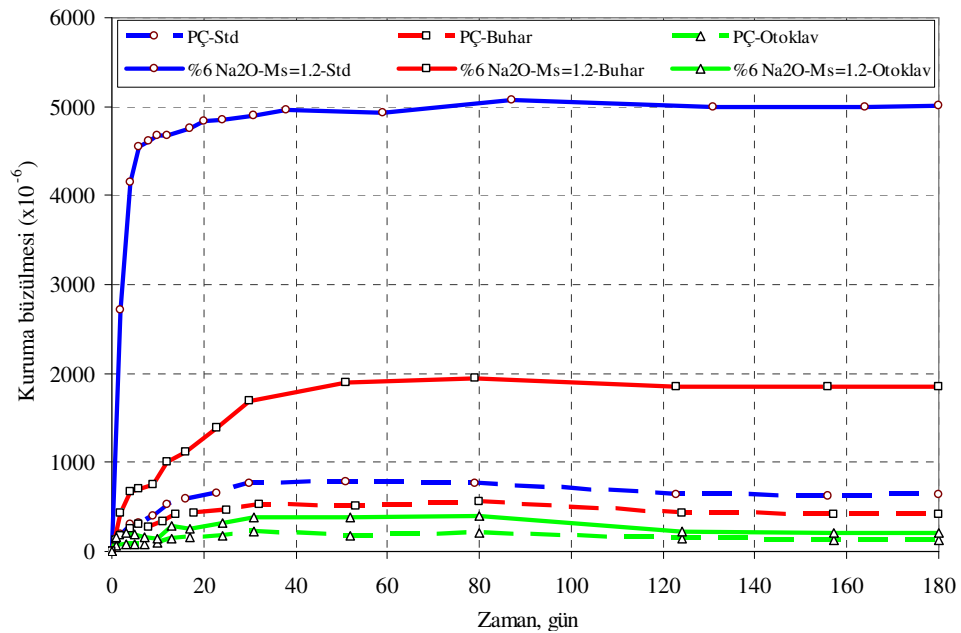


Şekil 6.34  $M_s=1,6$  için AAH'nin zamana bağlı olarak boy değişimi.

Sürekli olarak su içerisinde bekletilen numuneler üzerinde yapılan ölçümler, AAH'nin bağlayıcısı PC olan kontrol karışımına kıyasla bir miktar daha fazla genişlediğini göstermiştir. Bununla birlikte, genleşme değerleri oldukça düşük mertebelere sahiptir.

Şekil 6.35'te ısıtım işlem uygulamasının PÇ harcının ve %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub>'i 1,2 olan harç karışımının kuruma büzülmesi üzerinde etkisi görülmektedir. AAH'ın kuruma büzülmesi ısıtım işlem uygulanırsa bile çimento esaslı bağlayıcılara kıyasla daha fazladır. Standart kür durumunda AAH'ın kuruma büzülmesi PÇ harçlarından yaklaşık 8 kat, buhar küründe yaklaşık 4,5 kat, otoklav küründe ise yaklaşık 1,5 kat daha fazladır.

Bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımı için, standart koşullardaki duruma göre kıyaslama yapıldığında, buhar kürü uygulanması ile kuruma büzülmesinin %34 oranında, otoklav kürü uygulanmasıyla ise %80 oranında azaldığı görülmüştür. Yüzde 6 oranında Na<sub>2</sub>O içeren ve M<sub>s</sub> değeri 1,2 olan harç karışımlarının kuruma büzülmesi değeri ise buhar kürü ile %63, otoklav kürü ile %96 oranında azalmıştır. Buradan ısıtım işlem uygulanması ile alkalilerle aktive edilmiş harçların kuruma büzülmesi değerlerinin çimento esaslı bağlayıcılara kıyasla daha fazla oranda azaltılabileceği sonucu çıkmaktadır. Isıtım işlem uygulanması ile azalan büzülme Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999b) tarafından da rapor edilmiş olup, bu durum yüksek kür sıcaklıklarında oluşan C-S-H'nin daha düşük su içeriğine sahip olmasına bağlanmıştır.



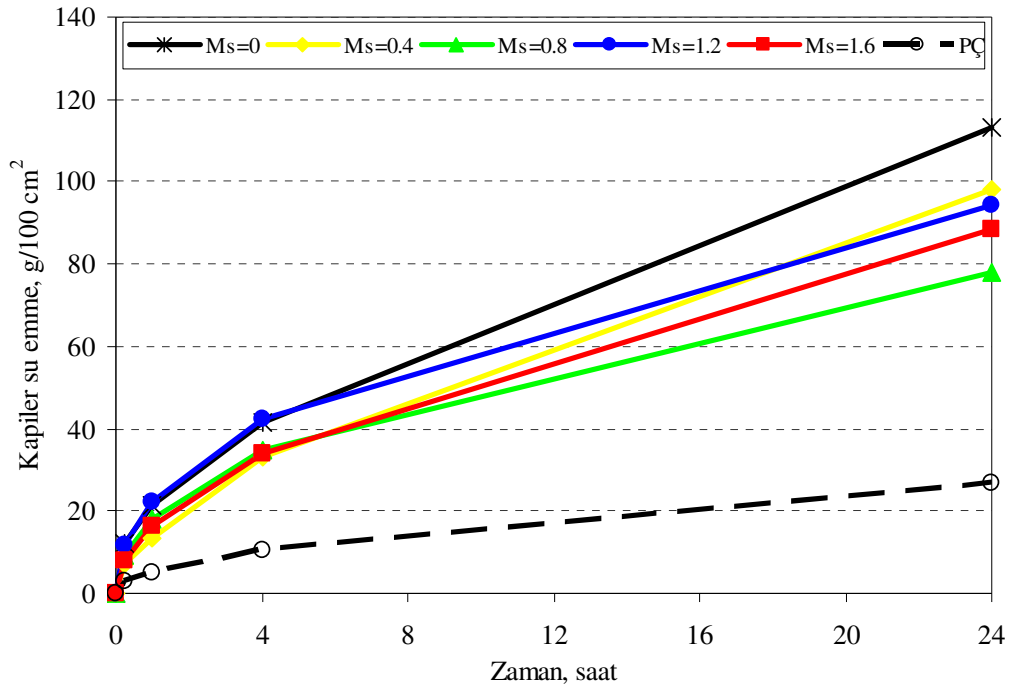
Şekil 6.35 Otoklav ve buhar kürünün PÇ harçlarının ve AAH'ın kuruma büzülmesine etkisi.



Goodspeed, Vanikar ve Cook (1998) sınıflandırmasına göre normal beton için büzülme deformasyonu;  $<400 \times 10^{-6}$  iyi,  $400 \times 10^{-6}$  -  $600 \times 10^{-6}$  arası orta,  $600 \times 10^{-6}$  -  $800 \times 10^{-6}$  arası kötü,  $>800 \times 10^{-6}$  çok kötü olarak verilmiştir. Bu değerler beton için verilmiş olup, harçların büzülme değerleri artan bağlayıcı dozajından ve azalan en büyük agrega tane boyutundan dolayı, tüm diğer şartların aynı olması halinde, betonun büzülme değerinin yaklaşık iki katıdır (Mindess, Young ve Darwin, 2003). Buradan hareketle, harçlar için  $1200 \times 10^{-6}$  civarındaki büzülme deformasyonları kabul edilebilir olmaktadır. Bu şart, ısı işlem uygulanmadığı takdirde, sadece  $M_s=0$  olan harçlar tarafından sağlanmaktadır. Buhar kürü uygulanması durumunda ise, kuruma büzülmesindeki azalmanın %6  $\text{Na}_2\text{O}$   $M_s=1,2$  olan karışımdakine benzer olacağı varsayımıyla,  $M_s$  değeri 0,4 olan harçlar için de sağlanabileceği düşünülmektedir. Otoklav kürü durumunda ise, tüm karışımlar bu limitin altında büzülme gösterecek gibi görünmektedir.

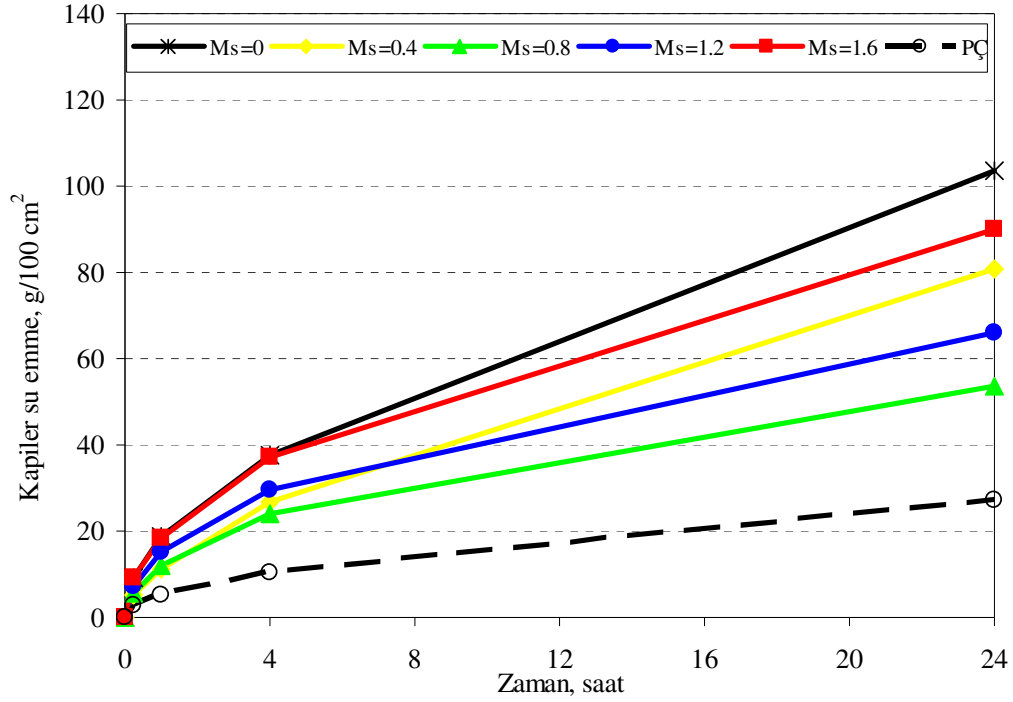
### 6.5 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Bağlantılı Boşluk Oranları

Şekil 6.36'da standart kür geçirmiş %4  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren karışımların kapiler su emme miktarlarının  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, alkalilerle aktive edilmiş harçların kapiler su emme miktarları bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımına kıyasla oldukça yüksek mertebelere sahiptir.  $M_s$  oranına bağlı olarak kapiler su emme miktarlarının değişimi incelendiğinde,  $M_s$  değerinin 0,8'e kadar artışı kapiler su emme miktarlarını azaltırken, bu değer üzerinde kapiler su emme miktarı artış göstermektedir. Bununla birlikte,  $M_s=1,6$  değerinde bile kapiler su emme miktarı  $M_s=0$  değerindekinden daha düşüktür.



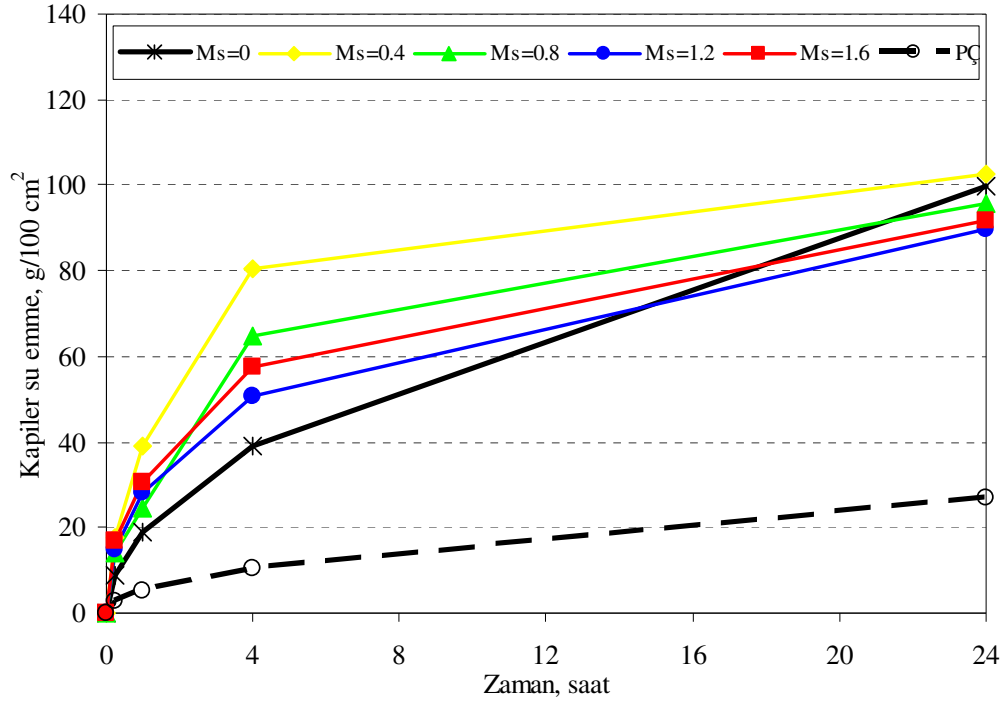
Şekil 6.36 Standart su kürü geçirmiş %4 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'ın kapiler su emme miktarının zamanla değişimi.

Şekil 6.37'de standart kür geçirmiş %6 Na<sub>2</sub>O içeren karışımların kapiler su emme miktarlarının  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Görüldüğü gibi, %4 oranında Na<sub>2</sub>O içeren karışımlardakine benzer şekilde, alkalilerle aktive edilmiş harçların kapiler su emme miktarları bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımına kıyasla daha yüksek mertebelindedir. Bununla birlikte, aradaki fark bir miktar azalma göstermiştir.  $M_s$  oranına bağlı olarak kapiler su emme miktarlarının değişimi incelendiğinde,  $M_s$  değerinin 0,8'e kadar artışı kapiler su emme miktarlarını azaltırken, bu değer üzerinde kapiler su emme miktarı artış göstermektedir. Bununla birlikte,  $M_s=1,6$  değerinde bile kapiler su emme miktarı  $M_s=0$  değerindekinden daha düşüktür.



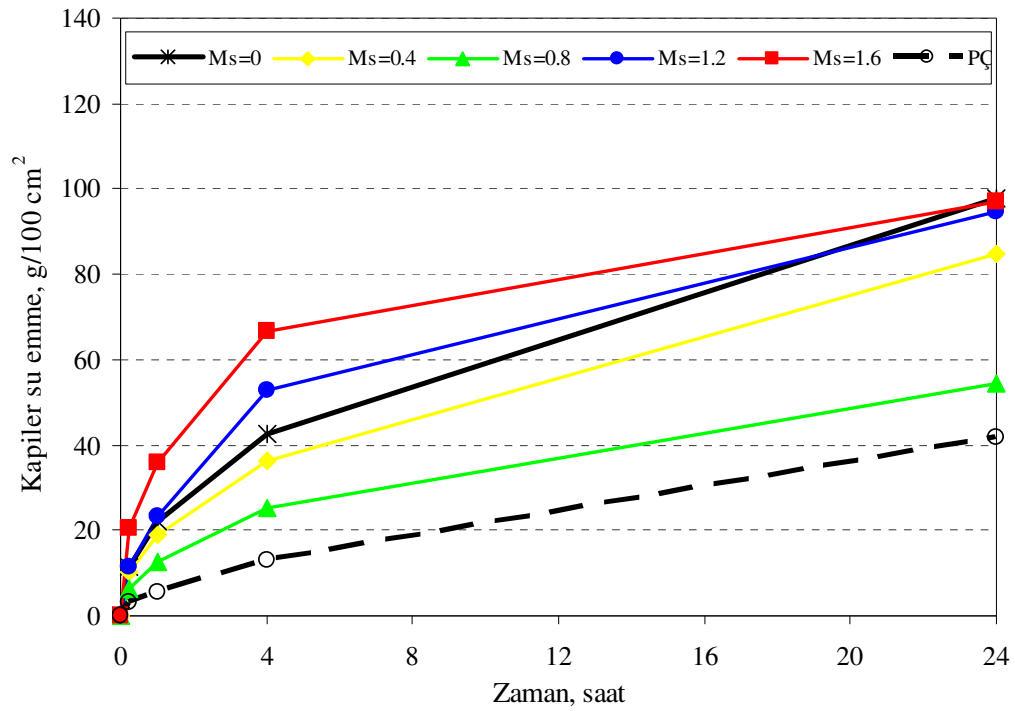
Şekil 6.37 Standart su kürü geçirmiş %6 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'ın kapiler su emme miktarının zamanla değişimi.

Şekil 6.38'de standart kür geçirmiş %8 Na<sub>2</sub>O içeren karışımların kapiler su emme miktarlarının  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Diğer oranlarda olduğu gibi, AAH'ın kapiler su emme miktarları bağlayıcısı PÇ olan kontrol karışımına kıyasla daha yüksek mertebelindedir. İlk 4 saatlik süre zarfında,  $M_s$  değerinin artışı kapiler su emme miktarlarının artışı ile sonuçlanmıştır. 24 saat sonunda ise,  $M_s=0,4$  değerindeki kapiler su emme oranının  $M_s=0$  değerine sahip harçlarınkinden daha yüksek olduğu, diğer harçların kapiler su emme miktarının ise daha düşük düzeyde kaldığı görülmüştür.  $M_s=0,4$  ve  $M_s=0,8$  oranlarında kapiler su emme miktarında oluşan artışın sebebi, önceki bölümlerde de açıklandığı üzere, bu oranlarda harç karışımlarının işlenebilirliğinin düşük olması ve hızlı kıvam kaybı nedeniyle tam olarak yerleştirmenin sağlanamamasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.38 Standart su kürü geçirmiş %8 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'nin kapiler su emme miktarının zamanla değişimi.

Şekil 6.39'da buhar kürü geçirmiş %6 Na<sub>2</sub>O içeren karışımların kapiler su emme miktarlarının  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Standart su kürü durumundakine benzer şekilde,  $M_s$  değerinin 0,8'e kadar artışı kapiler su emme miktarlarını azaltırken, bu değer üzerinde kapiler su emme miktarı artış göstermektedir. Ancak,  $M_s=1,2$  ve  $1,6$  değerlerinde kapiler su emme miktarının deney süresince her zaman  $M_s=0$  değerine kıyasla daha yüksek olduğu dikkati çekmektedir. Buhar kürü geçirmiş, bağlayıcısı PÇ olan kontrol karışımına kıyasla, AAH'nin kapiler su emme miktarlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak,  $M_s=0,8$  değerindeki kapiler su emme miktarının kontrol karışımına oldukça yaklaştığı görülmektedir.

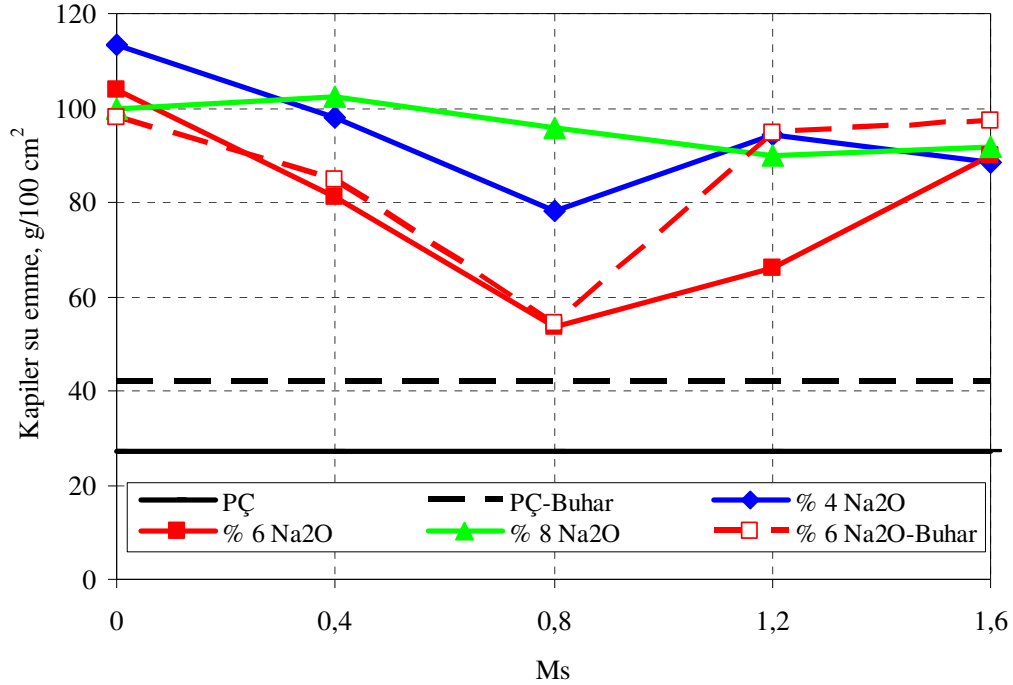


Şekil 6.39 Buhar kürü geçirmiş %6 Na<sub>2</sub>O içeren AAH'ın kapiler su emme miktarının zamanla değişimi.

Şekil 6.40'da 24. saat sonunda kapiler su emme miktarının  $M_s$  oranına ve Na<sub>2</sub>O oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Yüzde 4 ve %6 Na<sub>2</sub>O oranları için en düşük kapiler su emme miktarı  $M_s=0,8$  değerinde bulunmuştur. Bununla birlikte, %8 Na<sub>2</sub>O oranında 0,4 ve 0,8  $M_s$  oranlarında işlenebilirliğin düşük olması nedeniyle yerleştirme güçlüğü yaşanmıştır. Bunun sonucunda, oluşan boşluklu yapı nedeniyle kapiler su emme miktarlarında diğer Na<sub>2</sub>O oranlarında görülen eğilim görülmemiştir. Bu oranlarda  $M_s=0$  değerindeki kapiler su emme miktarından bile daha yüksek miktarda kapiler su emme görülmüştür.

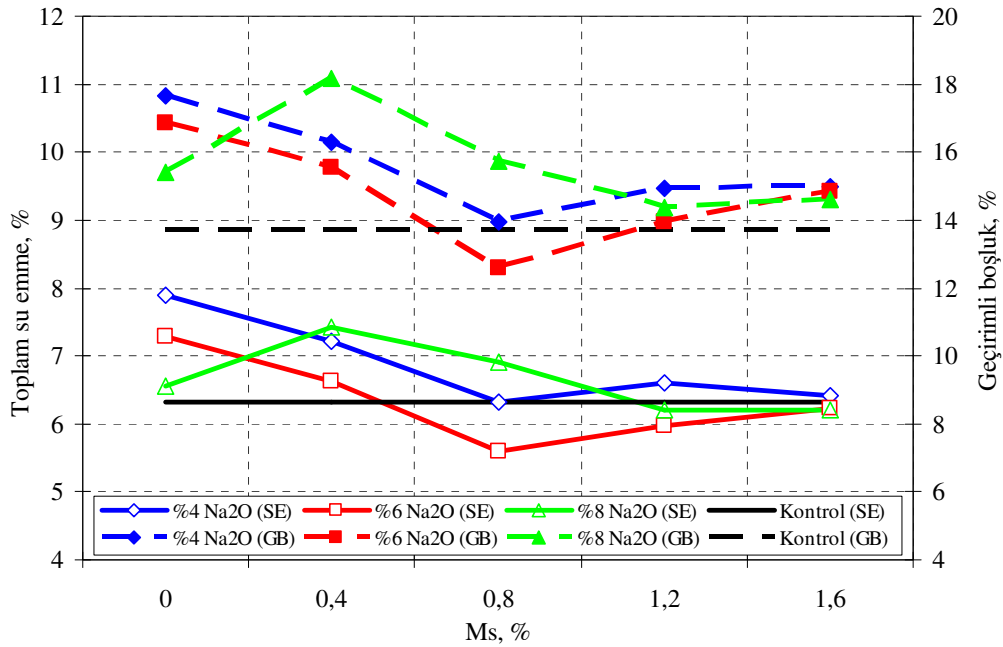
Şekil 6.40'da %6 Na<sub>2</sub>O oranında buhar kürü geçirmiş harçların kapiler su emme miktarları da verilmiştir. Görüldüğü gibi,  $M_s=0$  ile 0,8 arasında kapiler su emme miktarı buhar kürü ve standart su kürü için birbirine oldukça yakınken, 1,2 ve 1,6 değerlerinde, buhar kürü geçirmiş örneklerin kapiler su emme miktarları standart kür durumuna kıyasla daha yüksektir. Genel olarak değerlendirildiğinde en düşük kapiler su emme miktarı, %6Na<sub>2</sub>O oranında  $M_s=0,8$  değerinde elde edilmiştir. Bununla

birlikte, bu değer hem buhar küründe hem de standart kür durumunda bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımına kıyasla daha yüksektir.



Şekil 6.40 Kapiler su emme miktarının (24. saat)  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi.

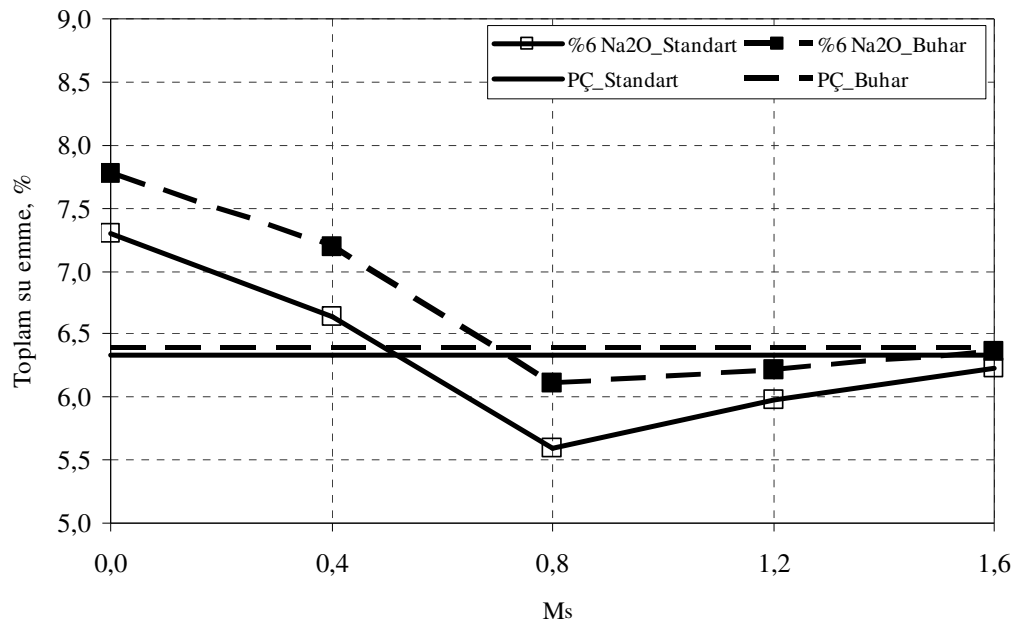
Toplam su emme miktarının ve bağlantılı boşluk oranının  $Na_2O$  ve  $M_s$  oranlarına bağlı olarak değişimi Şekil 6.41’de verilmiştir. Su emme miktarı ve bağlantılı boşluk oranlarının değişiminin kapiler su emme miktarının değişimiyle aynı eğilimde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 6.40’dan açıkça görüldüğü gibi, AAH’ın tamamının kapiler su emme miktarı bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımına kıyasla daha fazladır. Ancak, bazı karışımların toplam su emme miktarının ve bağlantılı boşluk oranının çimento bağlayıcılı karışıma kıyasla daha düşük olduğu dikkati çekmektedir. Bu durum, alkalilerle aktive edilmiş harçlardaki boşlukların çapının daha küçük olabileceğini akla getirmektedir. Bilindiği gibi, kapiler yolla su emme yüksekliği kılcal boşluk çapı küçüldükçe artmaktadır.



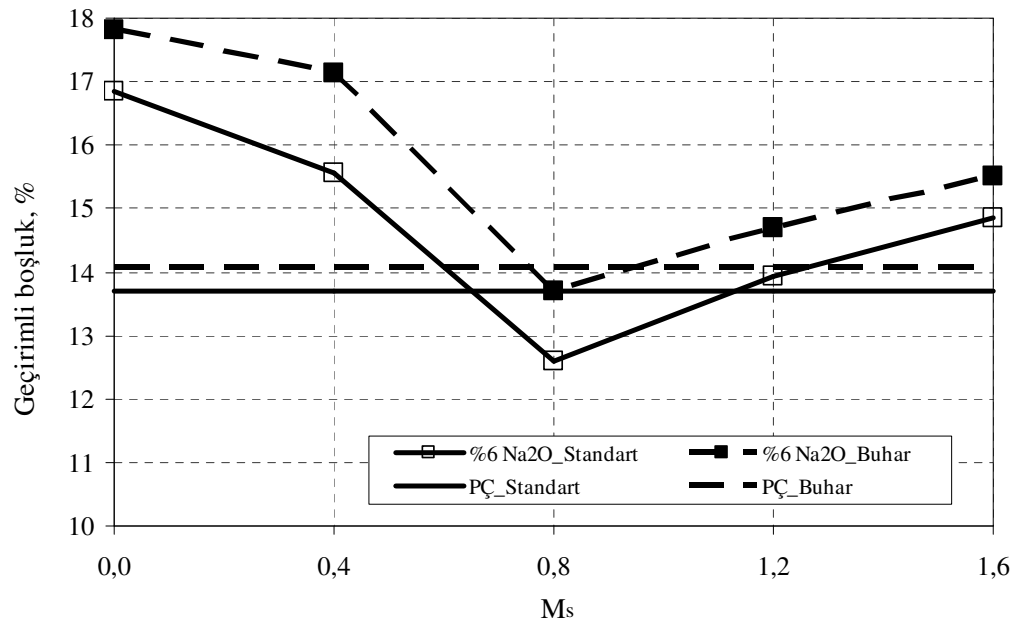
Şekil 6.41 Toplam su emme miktarının ve bağlantılı boşluk oranının  $M_s$  oranına bağlı olarak değişimi.

Şekil 6.42’de standart ve buhar kürü durumlarında %6  $Na_2O$  içeren karışımın ve PÇ bağlayıcılı kontrol karışımının su emme miktarının değişimi verilmiştir. Buhar kürü geçirmiş bağlayıcısı PÇ olan kontrol karışımının ve AAH karışımlarının su emme miktarı standart kür geçirmiş harçlara kıyasla daha yüksektir. Fakat aradaki fark, AAH’da daha yüksektir. Standart kür durumunda olduğu gibi, buhar küründe de  $M_s$  değeri 0,8 ve üzerinde olduğunda su emme miktarı kontrol karışımının altına düşmektedir. Optimum değer ise, yaklaşık  $M_s=0,8$  değerinde olması beklenir.

Şekil 6.43’te standart ve buhar kürü durumlarında bağlantılı boşluk oranının değişimi gösterilmiştir. Toplam su emme miktarının değişimine benzer bir eğilim mevcuttur. AAH’ların bağlantılı boşluk miktarı, her iki kür koşulu için de, sadece  $M_s=0,8$  durumunda kontrol karışımına kıyasla daha düşük oranda kalmıştır.



Şekil 6.42 Toplam su emme miktarının kür durumuna bağlı olarak değişimi.



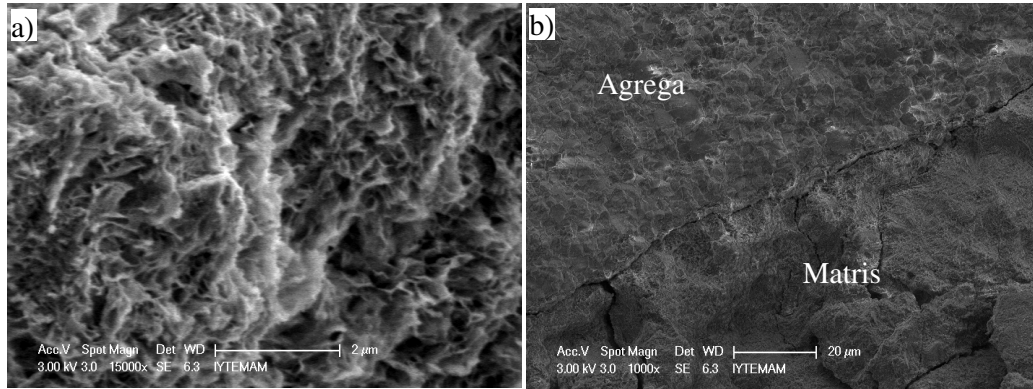
Şekil 6.43 Geçirimli boşluk oranının kür durumuna bağlı olarak değişimi.



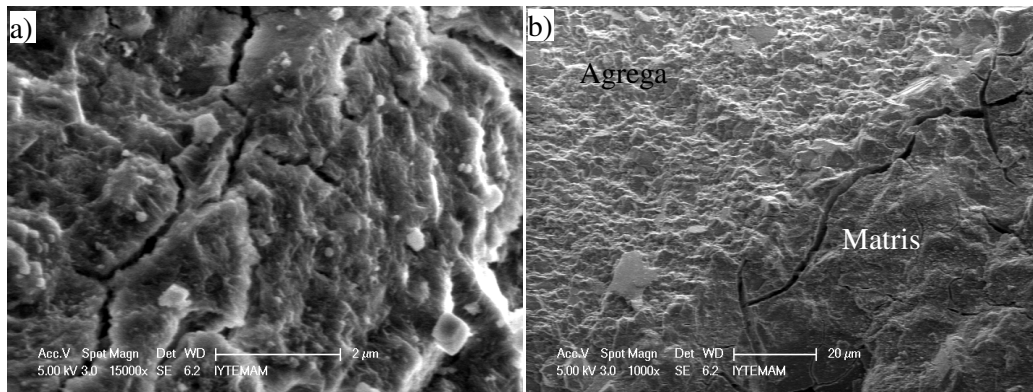
## 6.6 Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri (SEM, EDS, XRD, cıva porozimetresi), önceki bölümlerde elde edilen deney sonuçları ışığında seçilen bazı karışımlar üzerinde yapılmıştır.

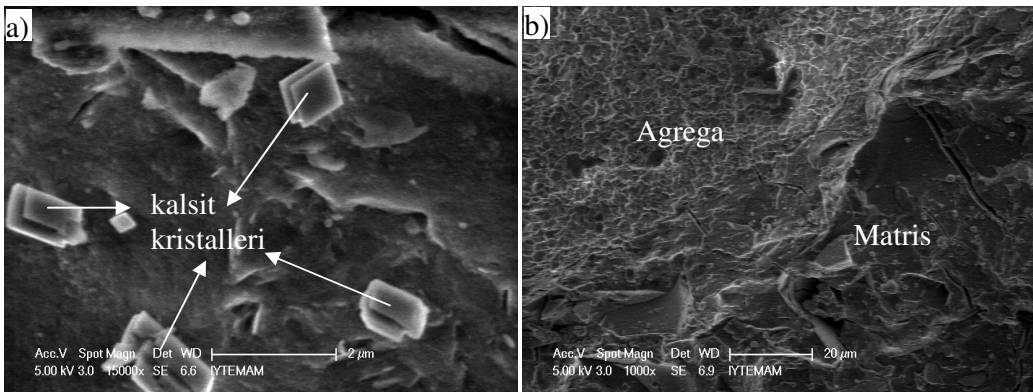
Yirmi sekiz gün standart su kürüne maruz bırakılmış numunelerin SEM (SE) görüntüleri Şekil 6.44-46'da verilmiştir.  $M_s=0$  iken gözenekli ve sıkı olmayan bir yapıya sahip olan matris,  $M_s$  oranının artması ile daha yoğun ve sıkı bir hal almıştır. Matristeki çatlak oluşumunun  $M_s$  değerinin yükselmesi ile arttığı görülmüştür. Agregam-matris ara yüzeyindeki hasarın da  $M_s$ 'deki artışla büyüdüğü görülmektedir. SEM (BSE) görüntülerinde çatlak oluşumları daha iyi görülebilmektedir. Ayrıca, BSE görüntüleri SE görüntülerine kıyasla genel durumu daha iyi yansıtmaktadır. Bu görüntülerde, açık gri taneler hidrate olmamış YFC tanelerini, koyu gri taneler kuvars agregası tanelerini, aradaki kısım ise hidrate olmuş kısım olup matrisi ifade etmektedir. Siyah kısımlar ise, boşlukları göstermektedir. Şekil 6.47'den görüleceği gibi,  $M_s=0$  iken matriste çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır. Bununla birlikte,  $M_s$ 'deki artışla çatlak oluşumu artmıştır (Şekil 6.48-49). En fazla çatlak  $M_s=1,2$  durumunda ortaya çıkmıştır (Şekil 6.49). Hidrate olmamış YFC tanelerinin de çatladığı görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, incelenen karışımlar içerisinde en yüksek basınç dayanımı  $M_s=1,2$  için elde edilmiş olup, bunu  $M_s=0,4$  ve  $M_s=0$  takip etmektedir. Ayrıca,  $M_s=0$  durumunda basınç dayanımı diğer oranlara kıyasla çok daha düşüktür. Bu durum, diğer karışımlarda matrisin daha yoğun olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan, daha önce de söz edildiği gibi, eğilme dayanımları arasındaki fark basınç dayanımındaki kadar bariz değildir. Şöyle ki,  $M_s=0,4$  ve  $1,2$  için elde edilen basınç dayanımı  $M_s=0$  durumundakinin sırasıyla, yaklaşık 2,5 ve 3 katıdır. Bununla birlikte, eğilme dayanımı için bu oranlar sırasıyla 1,13 ve 1,07'dir. Basınç dayanımı eğilme dayanımı oranı ise 0, 0,4 ve 1,2  $M_s$  oranları için sırasıyla 2,44, 5,47 ve 6,86'dır. Bu durum yüksek  $M_s$  oranlarında ara yüzeyde ve matriste oluşan çatlakların eğilme dayanımını daha fazla etkilemesinin bir sonucudur.



Şekil 6.44 SEM (SE), standart su kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



Şekil 6.45 SEM (SE), standart su kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



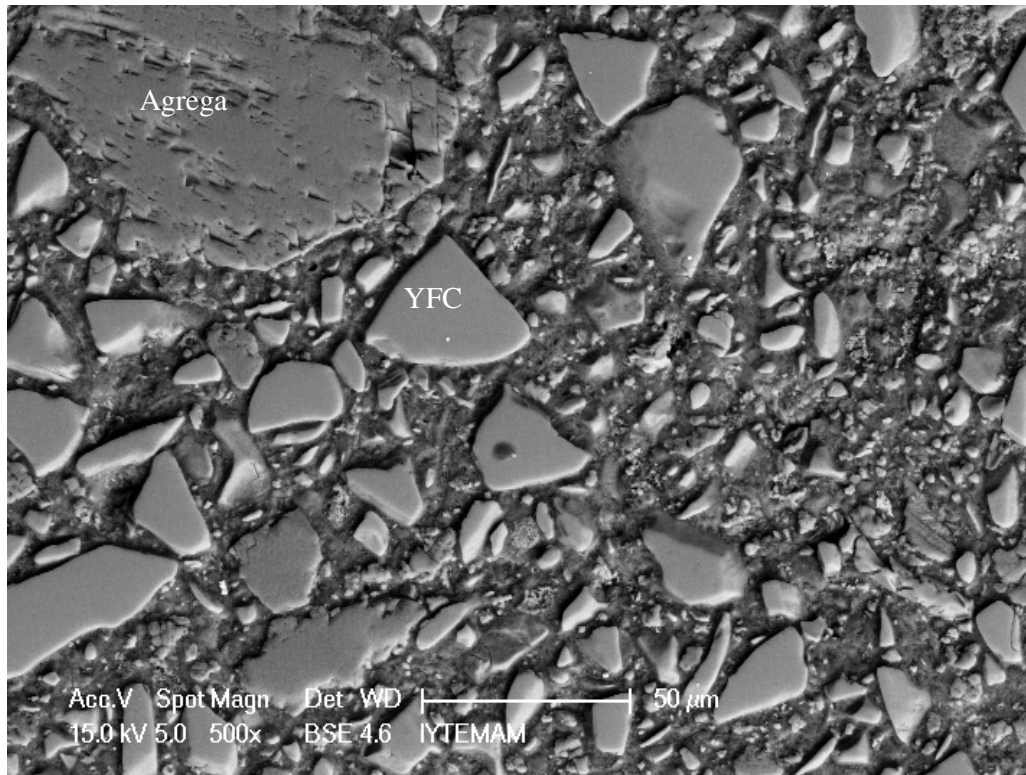
Şekil 6.46 SEM (SE), standart su kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.

Yirmi sekiz gün standart su kürüne maruz bırakılmış harç numunelerinin matris fazı üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Tablo 6.9'da verilmiştir. M<sub>s</sub> oranının artmasıyla Ca/Si oranının ve Na miktarının azaldığı görülmektedir. Oluşan yapının

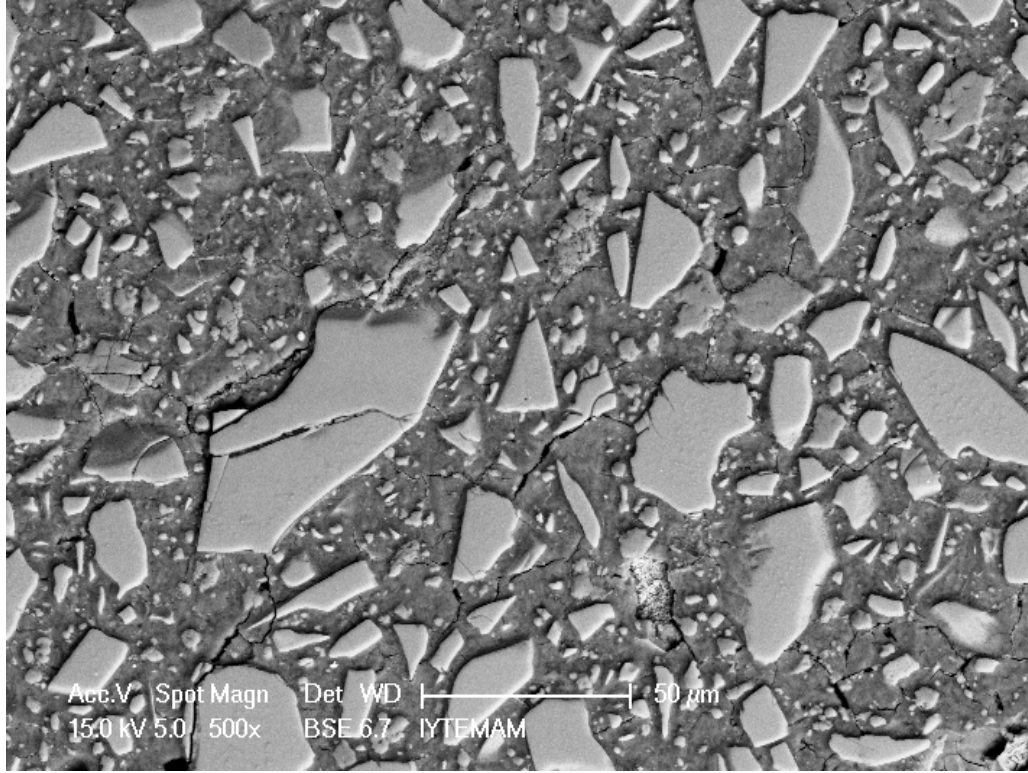
bazı araştırmacılar tarafından varlığı öne sürölen  $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  (N-C-S-H) tipi bir yapı olduğu düşünölmektedir. AA-YFC'deki  $\text{Na}^+$  iyonlarının suda çok düşük çözünebilirliğinden ötürü, katı bir N-C-S-H çözeltisinin olduğu bazı araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Yang, Song, Ashour ve Lee, 2007). Ca/Si oranının azalması ise, matrisin bağlayıcılığındaki artışa işarettir. Azalan Ca/Si oranıyla artan bağlayıcılık mekanik deney sonuçlarıyla uyumludur.

Tablo 6.9 Standart su kürü geçirmiş harçların matris fazının EDS analizi

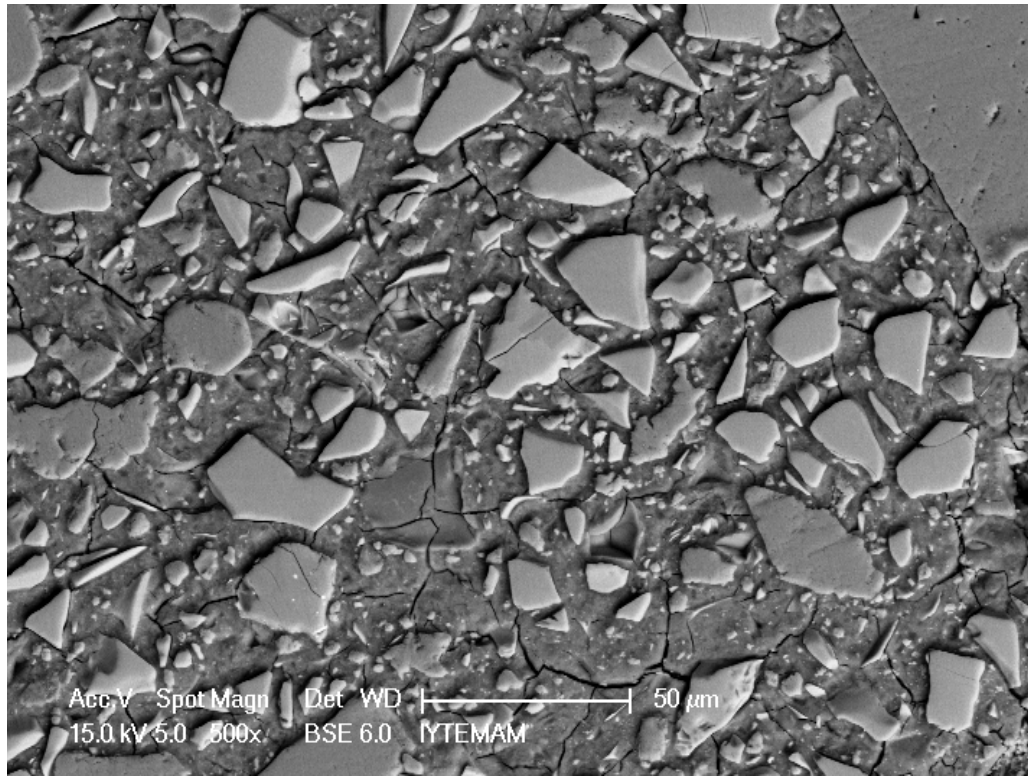
Element	6/0		6/0,4		6/1,2
C	22.27	9.78	10.46	6.81	7.54
O	35.50	38.79	41.12	40.94	33.58
Fe	3.46	4.02	3.42	3.53	3.49
Na	7.35	7.32	5.19	4.61	3.94
Mg	1.94	1.89	2.81	3.39	2.98
Al	3.05	2.96	3.69	5.20	4.59
Si	9.03	6.65	11.13	13.78	17.41
S	0.70	0.47	0.55	0.53	0.70
Cl	0.23	0.31	0.18	0.00	0.32
K	1.05	0.90	0.97	0.94	1.41
Ca	15.42	26.91	20.47	20.27	24.04
Ca/Si	1.71	4.05	1.84	1.47	1.38



şekil 6.47 SEM (BSE), standart su kürü %6  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s=0$  harcı.

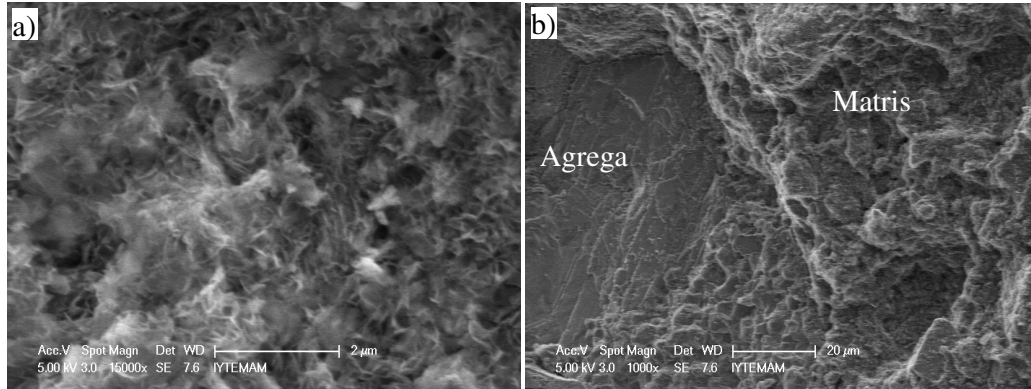


Şekil 6.48 SEM (BSE), standart su kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı.

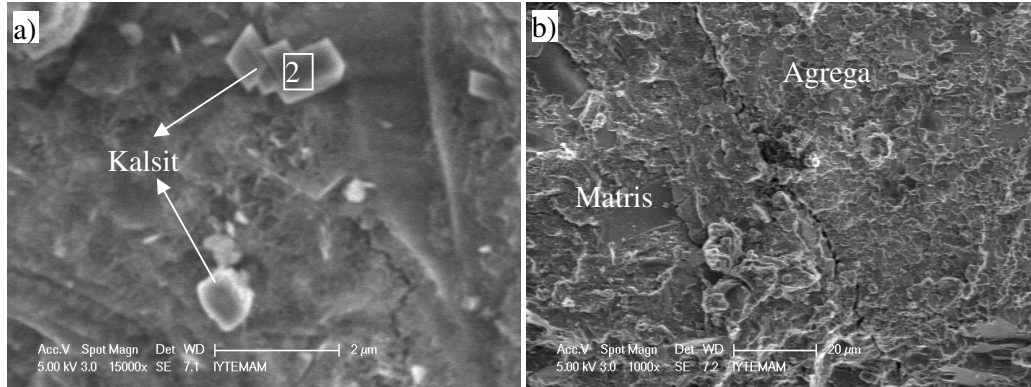


Şekil 6.49 SEM (BSE), standart su kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı.

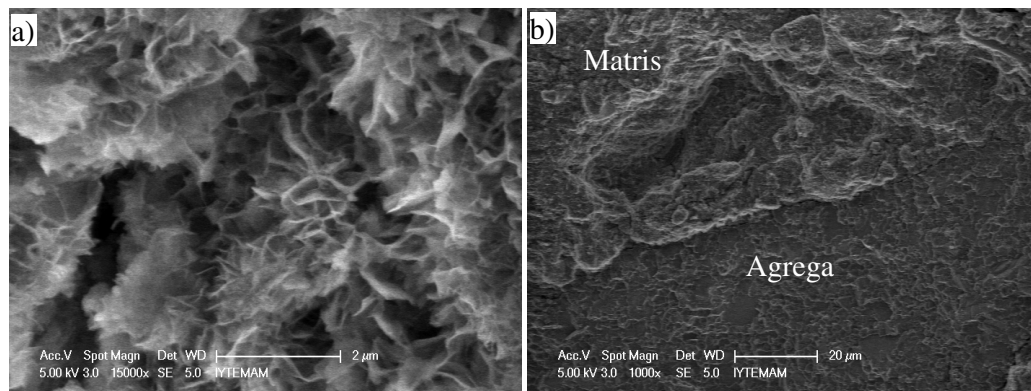
Şekil 6.50-55 arasında buhar kürü geçirmiş örneklerin SEM (SE) görüntüleri verilmiştir. Yüzde 2 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub>=1,2 karışımının M<sub>s</sub>=0 karışımına göre daha yoğun bir matrise sahip olduğu, bununla birlikte agrega-matris ara yüzeyinin daha çatlaklı olduğu görülmektedir. Benzer durum, %6 Na<sub>2</sub>O içeren karışımlarda da gözlenmiştir. SEM (BSE) görüntüleri M<sub>s</sub>=0 durumunda (%2 ve %6 Na<sub>2</sub>O oranında) ve M<sub>s</sub>=1,2 (%2 Na<sub>2</sub>O oranında) çatlaksız fakat yoğun bir yapının hakim olduğunu gösterirken (Şekil 6.55-57), %6 Na<sub>2</sub>O oranında M<sub>s</sub> oranındaki artışla çatlakların arttığı, fakat yapının yoğun bir hal aldığı görülmektedir (Şekil 6.58-60). M<sub>s</sub> değerinin artmasıyla YFC tanelerinin hidrate olan kısımları da önemli ölçüde artmıştır. Şekil 6.59'da YFC tanelerinin hidrate olan kısımları açıkça görülmektedir. Hidrate olan YFC tanesi miktarındaki artış daha fazla bağlayıcı oluşumuna katkıda bulunması nedeniyle dayanımlarda artış sağlamıştır. Mekanik deney sonuçlarından da hatırlanacağı üzere, M<sub>s</sub> değeri 0 iken dayanımlar oldukça düşük seviyede, M<sub>s</sub> değerinin yükselmesiyle dayanımlar artmıştır. M<sub>s</sub> değerinin yükselmesiyle çatlaklı yapıdaki artış, standart su küründe olduğu gibi, buhar küründe de eğilme dayanımının M<sub>s</sub> ile artışının basınç dayanımındakine kıyasla düşük düzeyde kalmasına yol açmıştır.



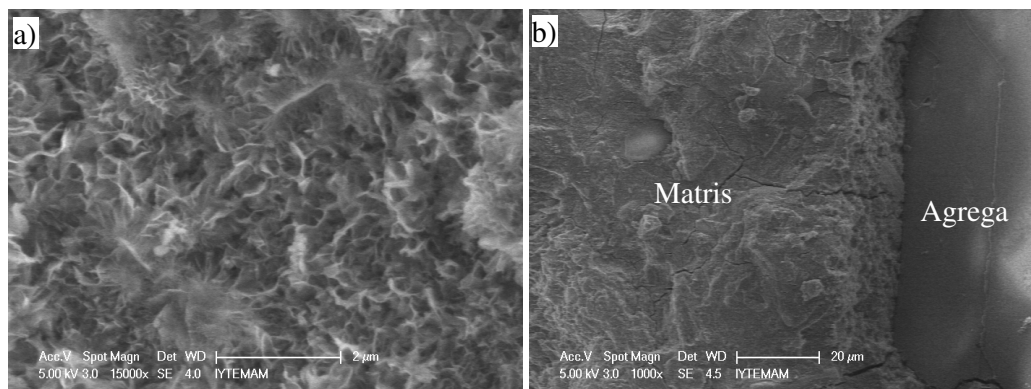
Şekil 6.50 SEM (SE), buhar kürü %2Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



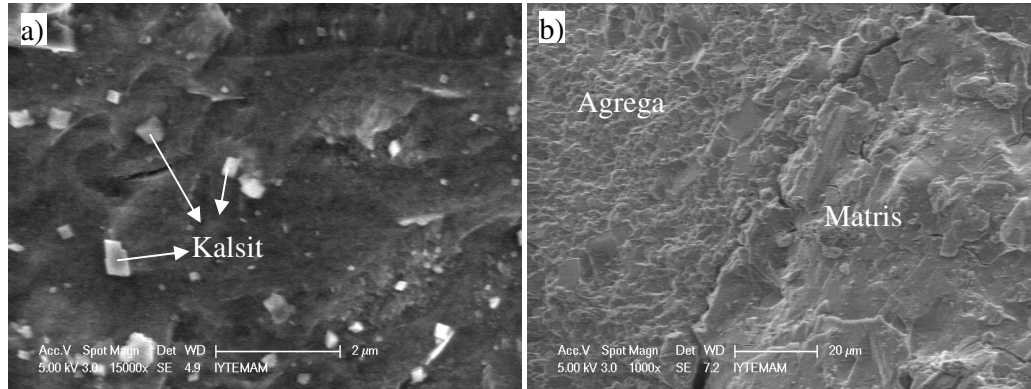
Şekil 6.51 SEM (SE), buhar kürü %2Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



Şekil 6.52 SEM (SE), buhar kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



Şekil 6.53 SEM (SE) buhar kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.

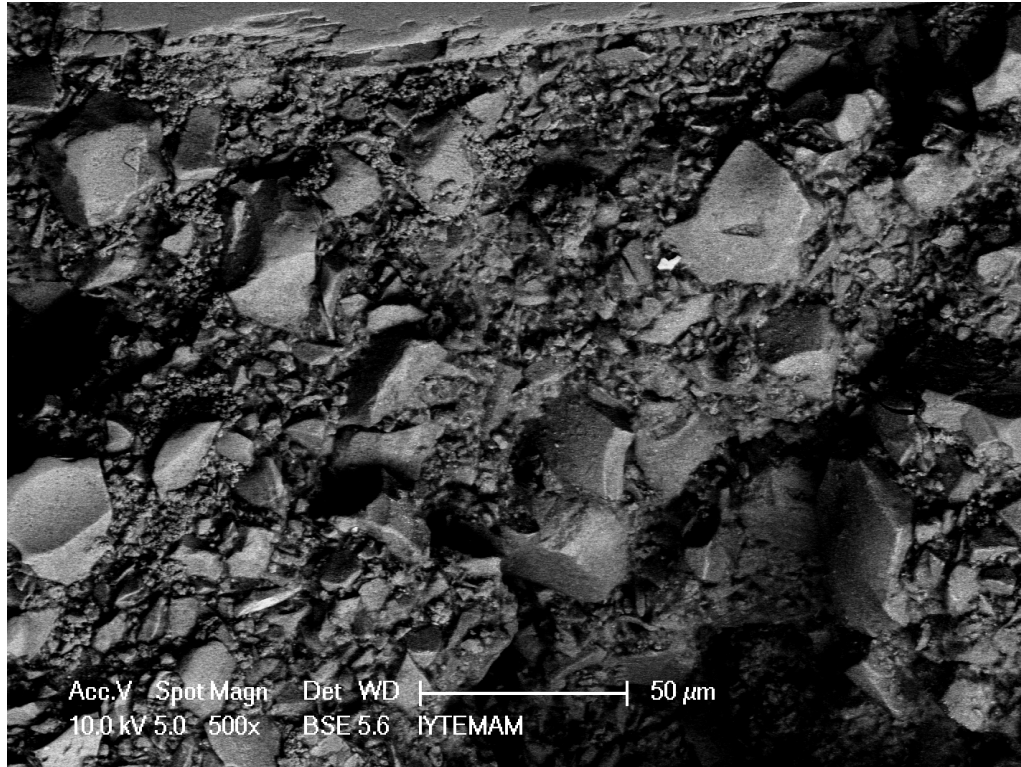


Şekil 6.54 SEM (SE) buhar kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.

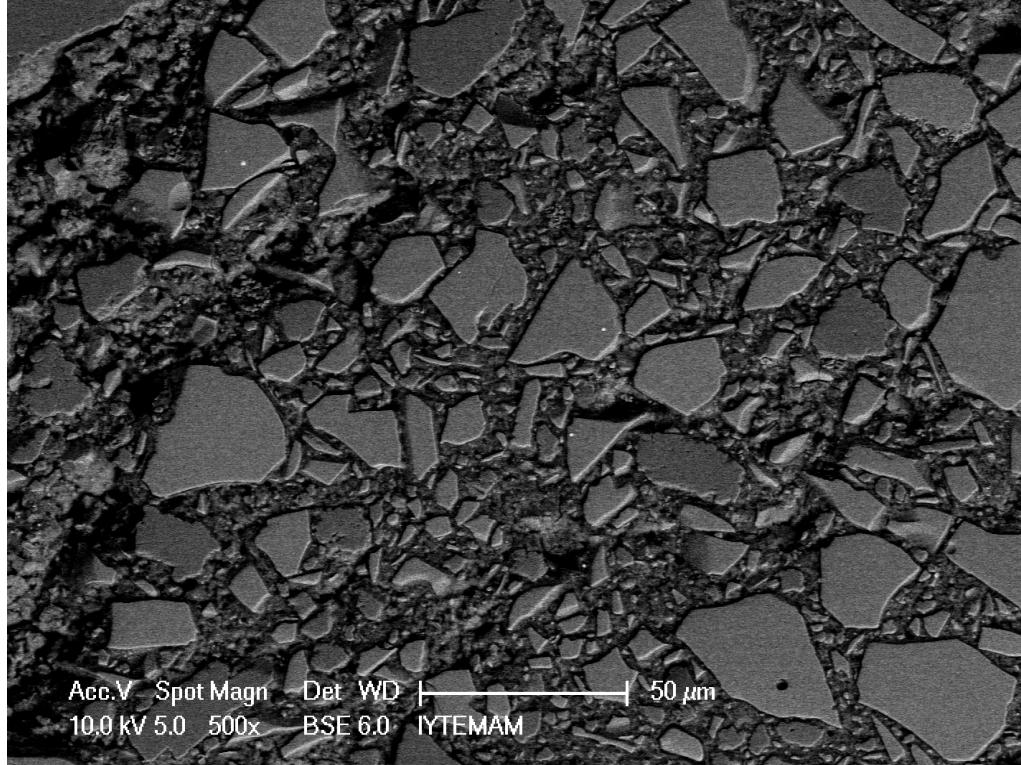
Buhar kürüne maruz kalmış harç numunelerinin matris fazı üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Tablo 6.10'da verilmiştir. Standart su küründe olduğu gibi, M<sub>s</sub> oranının artmasıyla Ca/Si oranının ve Na miktarının azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Şekil 6.51'de verilen 2 nolu nokta üzerinde yapılan EDS analizi, bu kristallerin kalsit olduğunu göstermiştir. Benzer oluşumlar, %6 Na<sub>2</sub>O oranında ve M<sub>s</sub>=1,2 oranında da gözlenmiştir.

Tablo 6.10 Buhar kürü geçirmiş harçların matris fazının EDS analizi

	2/0		2/1.2			6/0		6/0.4		6/1.2	
	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2
C	6.88	7.22	11.62	19.85	5.84	9.70	7.70	12.02	10.15	6.15	9.85
O	35.78	35.24	39.04	36.76	31.85	40.41	35.42	39.94	39.64	28.56	40.70
Fe	3.82	4.55	4.79	4.68	2.45	4.95	3.58	4.71	3.91	1.95	4.43
Na	5.12	6.22	2.69	1.74	2.65	6.38	6.23	4.98	5.82	3.23	6.12
Mg	3.45	3.04	1.69	1.12	2.46	1.23	1.17	1.37	1.82	1.95	3.21
Al	5.46	5.44	3.35	1.08	5.42	3.18	2.91	3.60	4.56	4.80	4.66
Si	15.47	14.10	8.88	1.83	18.67	10.08	9.37	11.94	15.34	19.95	16.06
S	0.70	0.97	0.76	0.45	0.76	0.27	0.41	0.32	0.47	0.72	0.41
Cl	0.29	0.34	0.52	0.42	0.44	0.17	0.29	0.20	0.17	0.67	0.09
K	1.18	1.36	1.11	0.33	1.38	0.89	0.97	0.95	1.17	2.13	0.99
Ca	21.84	21.52	25.56	31.76	28.07	22.75	31.95	19.96	16.95	29.89	13.47
Ca/Si	1.41	1.53	2.88	17.36	1.50	2.26	3.41	1.67	1.10	1.50	0.84

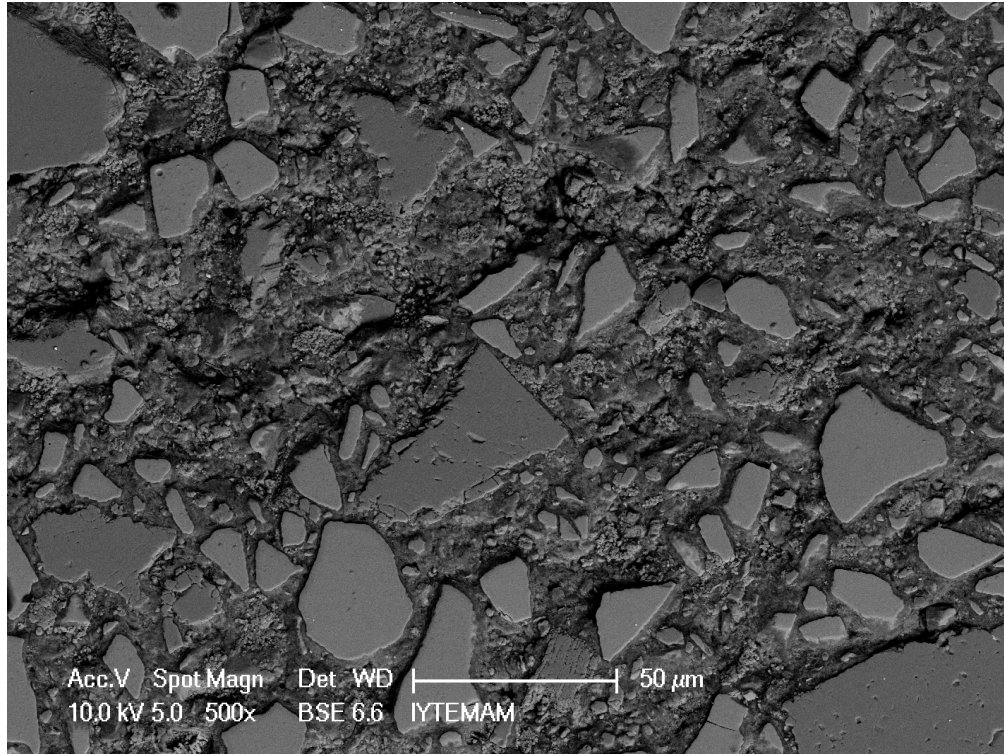


Şekil 6.55 SEM (BSE), buhar kütü %2 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı.

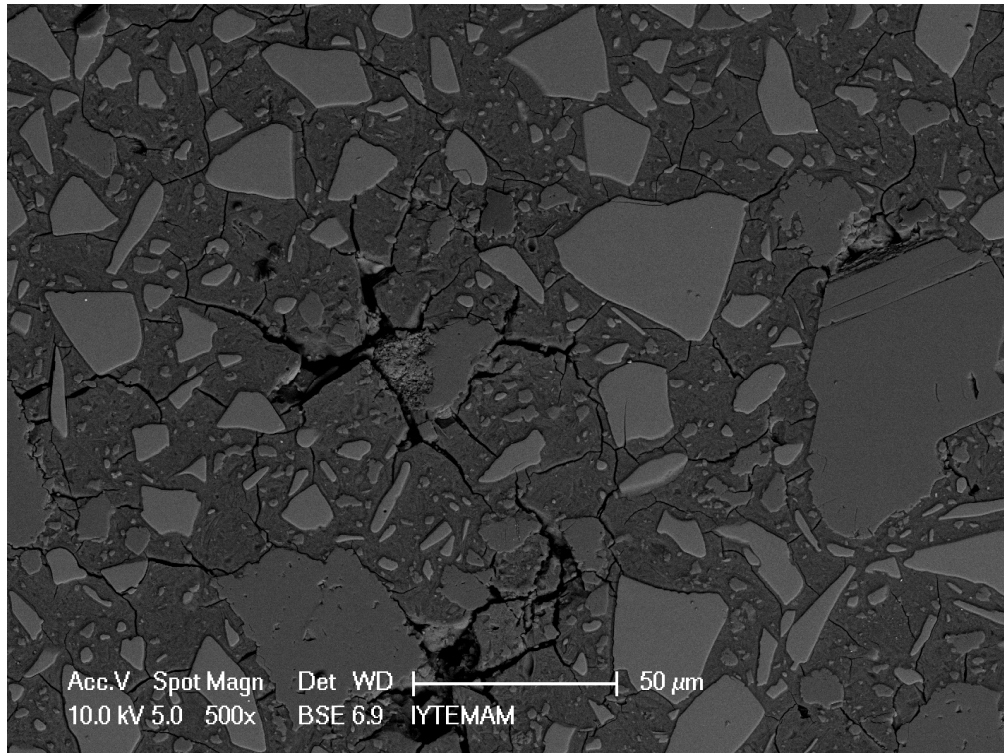


Şekil 6.56 SEM (BSE), buhar kütü %2 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı.

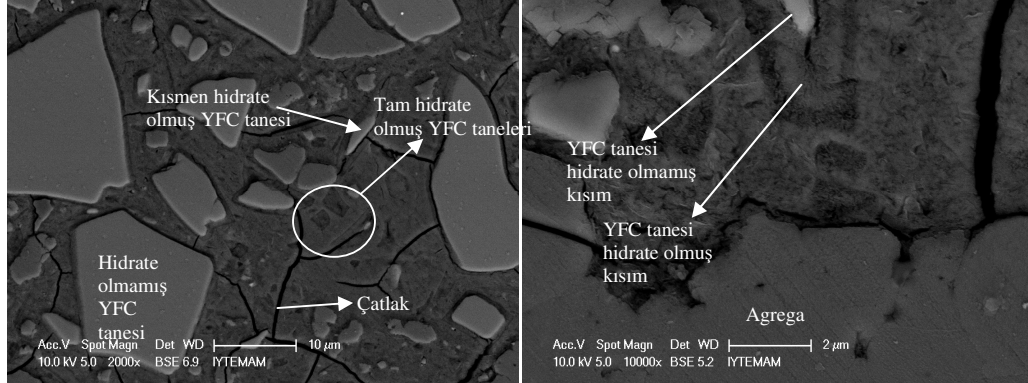




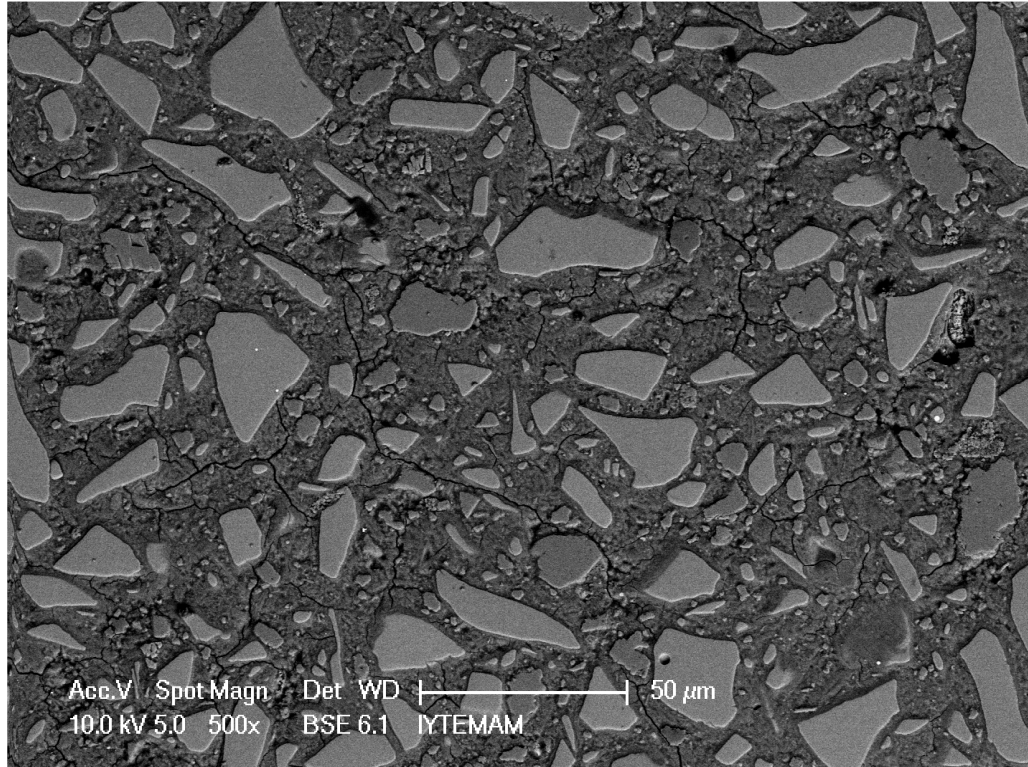
Şekil 6.57 SEM (BSE), buhar kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı.



Şekil 6.58 SEM (BSE), buhar kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı.



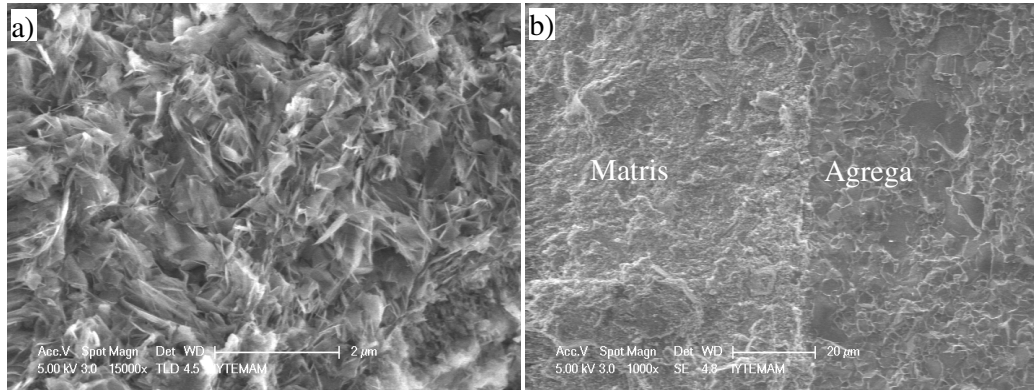
Şekil 6.59 SEM (BSE), buhar kürü %6  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s=0,4$  harcı.



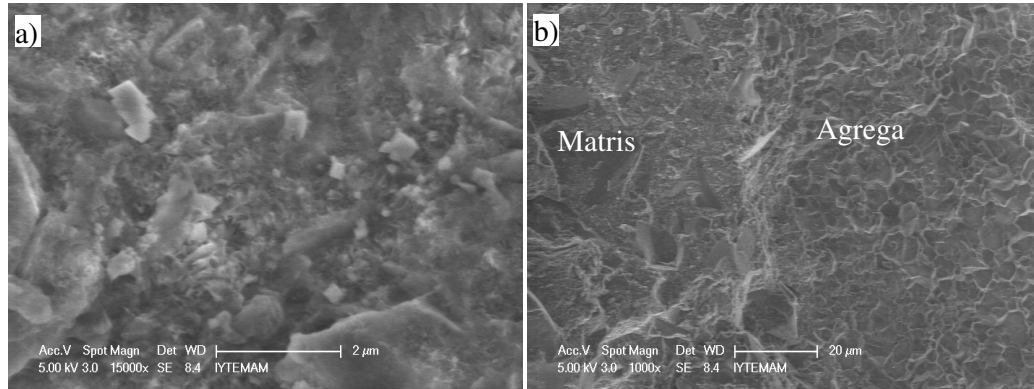
Şekil 6.60 SEM (BSE), buhar kürü %6  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s=1,2$  harcı.

Şekil 6.61-66 arasında otoklav kürü geçirmiş harçların SEM (SE) görüntüleri verilmiştir. %2  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren  $M_s=1,2$  karışımının otoklav kürü öncesi ön bekleme süresi diğer karışımlara göre daha uzun olup, basınç dayanımı yaklaşık 76 MPa'dır. Agregam-matris ara yüzeyinin tüm karışımlarda çok kuvvetli olduğu görülmüştür.  $M_s=0$  durumunda matris fazının diğer kür yöntemlerindeki kıyasla daha yoğun

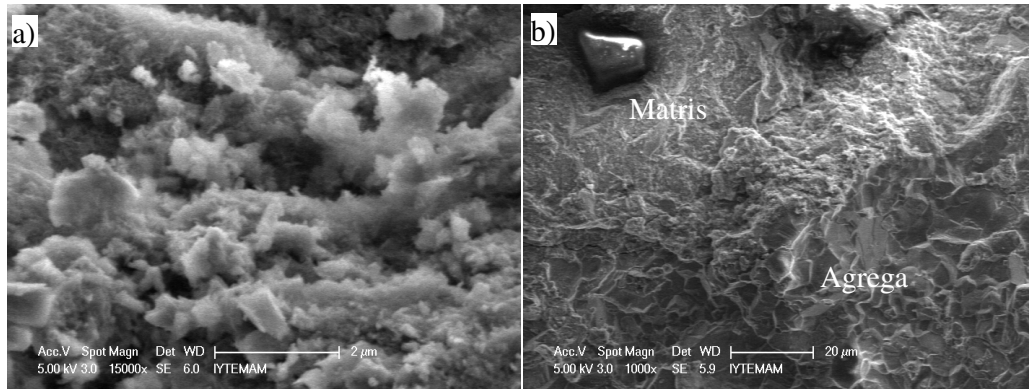
olduğu görülmektedir. Bu durum, otoklav küründe  $M_s=0$  için de yüksek mekanik performans elde edilmesinin nedenini açıklamaktadır. Standart su kürü ve buhar küründe boşlukların içerisi boş iken, otoklav küründe diğer kürlerden farklı olarak boşluk içerisinde bazı oluşumlar tespit edilmiştir (Şekil 6.66). EDS analizleri, bu oluşumların Ca/Si oranının 1,1 ile 1,5 arasında değiştiğini göstermiştir. Shi, Krivenko ve Roy (2006) bu oluşumların xonotlit ( $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$ ) kristalleri olduğunu rapor etmiştir.



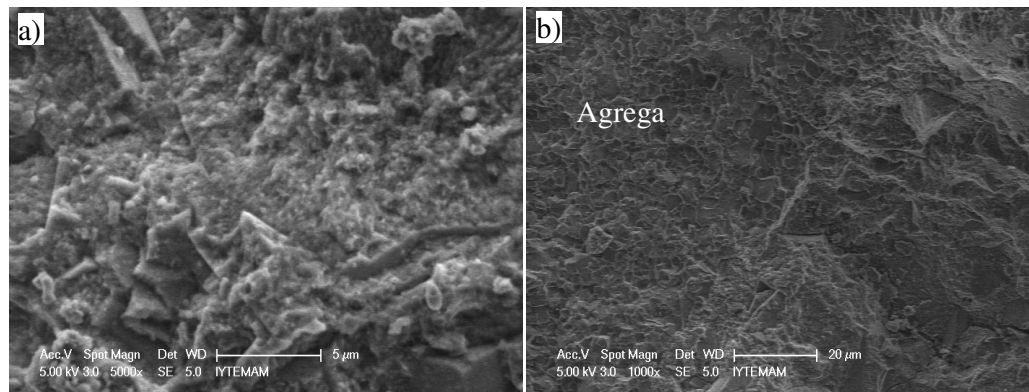
Şekil 6.61 SEM (SE), otoklav kürü %2  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s=0$  harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



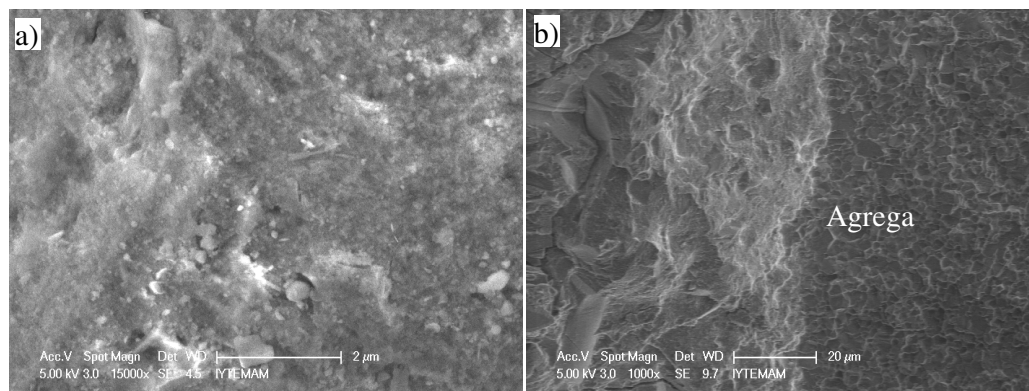
Şekil 6.62 SEM (SE), otoklav kürü %2  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $M_s=1,2$  harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



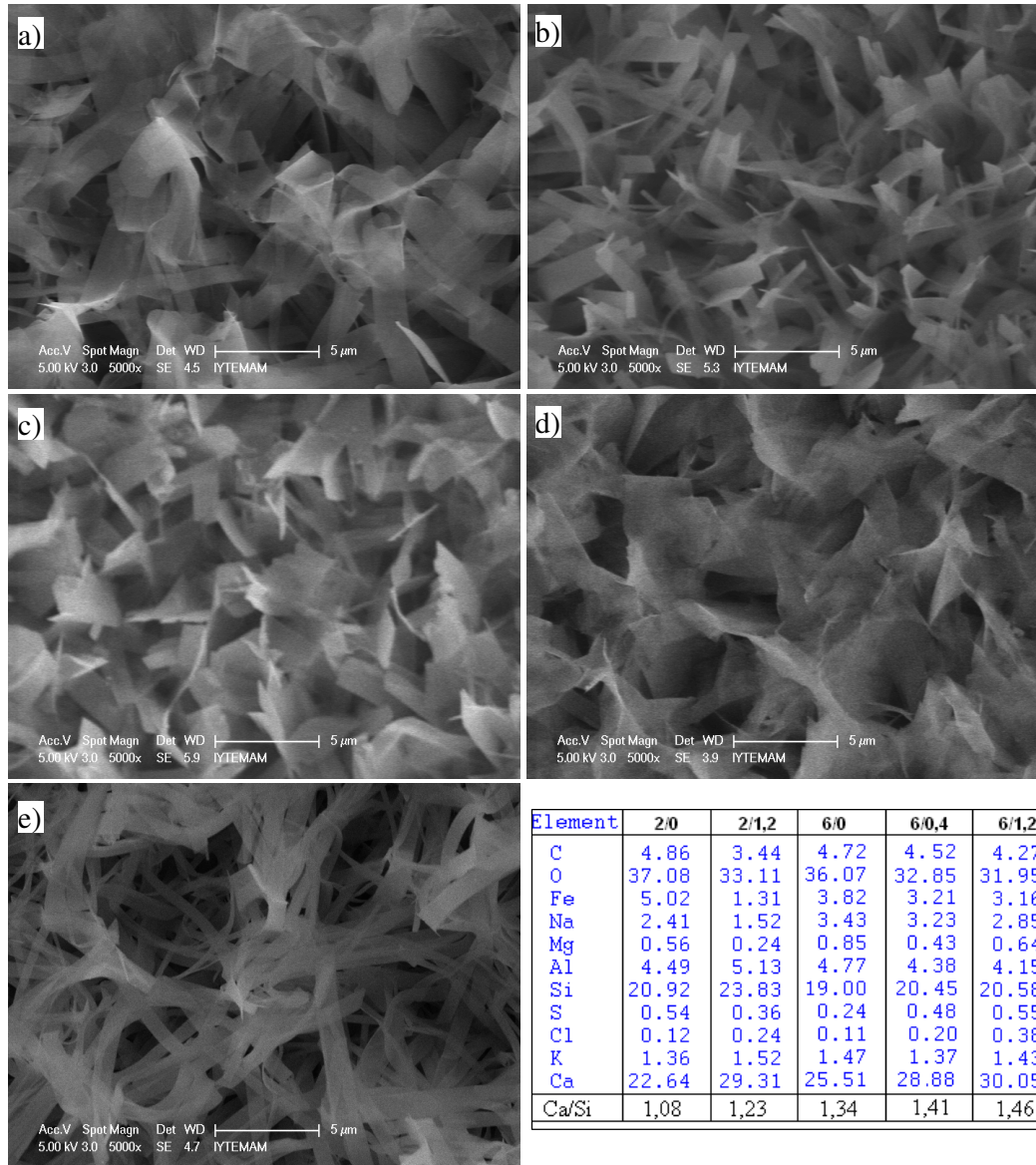
Şekil 6.63 SEM (SE), otlav kücü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



Şekil 6.64 SEM (SE), otlav kücü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



Şekil 6.65 SEM (SE), otlav kücü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı a) matris, b) agrega-hamur ara yüzeyi.



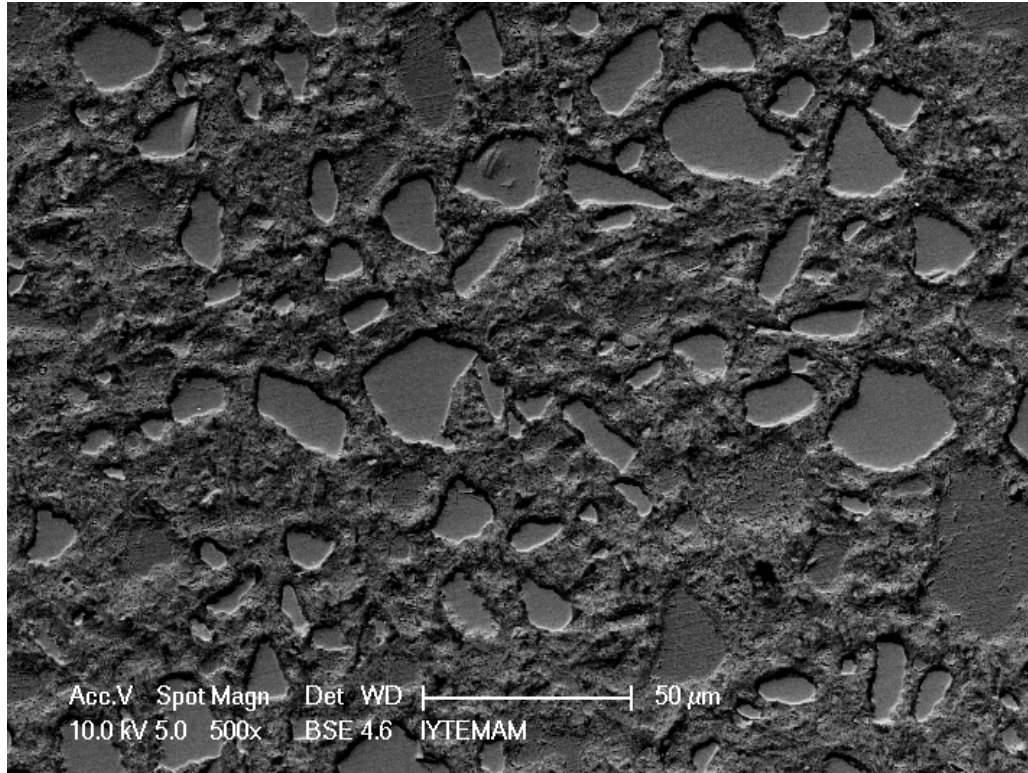
Şekil 6.66 SEM (SE), otoklav kürü boşluk içi oluşumlar, a) %2 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=0, b) %2 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=1,2, c) %6 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=0, d) %6 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=0,4, e) %6 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=1,2 (tabloda boşluk içi oluşumlarının EDS analizi verilmiştir).

Otoklav kürüne maruz kalmış harç numunelerinin matris fazı üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları Tablo 6.11’de verilmiştir. Ca/Si oranının artan M<sub>s</sub> ile azaldığı görülmüştür. Bu C-S-H jelinin bağlayıcı özelliğinde artış anlamına gelmektedir. Diğer yandan, M<sub>s</sub> değerinin artması ile matris fazında çatlak oluşumu artmıştır (Şekil 6.67-71). Bu durum, M<sub>s</sub>=0 durumuna kıyasla matristeki güçlenmeye rağmen dayanımın çok fazla artmasını engellemiştir. Bu nedenle, bazı durumlarda düşük M<sub>s</sub>

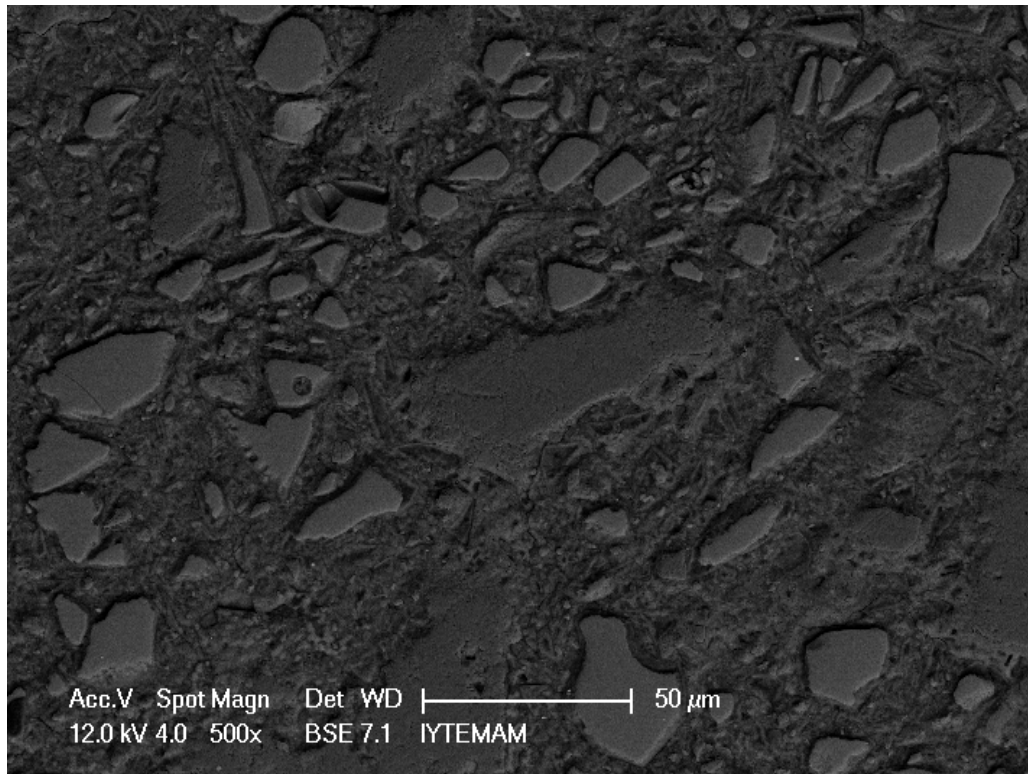
oranlarında, Ca/Si oranı daha yüksek olmasına rağmen, daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir. Çatlak oluşumları, SEM (SE) görüntülerinde tespit edilememiştir. Ancak çatlaklar SEM (BSE) görüntülerinde oldukça net bir şekilde görülebilmektedir. Yüzde 2 Na<sub>2</sub>O oranında hem düşük hem de yüksek M<sub>s</sub> oranlarında çatlak oluşmamıştır (Şekil 6.67-68). Bununla birlikte %6 Na<sub>2</sub>O oranında tüm M<sub>s</sub> oranlarında çatlak oluşmuştur (Şekil 6.69-70). Daha önce de belirtildiği gibi, standart ve buhar kürü durumunda M<sub>s</sub>=0 oranında matriste çatlak oluşmamıştır. Otoklav küründe M<sub>s</sub>=0 için çatlak oluşumuna rağmen, mekanik dayanımlar diğer kür yöntemlerine kıyasla çok daha yüksektir. Bunun nedeni, hidrate olan YFC miktarındaki artıştır. Şekil 6.69'dan görüleceği gibi, YFC tanelerinin bir kısmı tamamıyla, diğer bir kısmı ise büyük oranda reaksiyona girmiştir. Diğer M<sub>s</sub> oranlarında da benzer bir görüntü ortaya çıkmıştır (Şekil 6.70 ve 71).

Tablo 6.11 Otoklav kürü geçirmiş harçların matris fazının EDS analizi

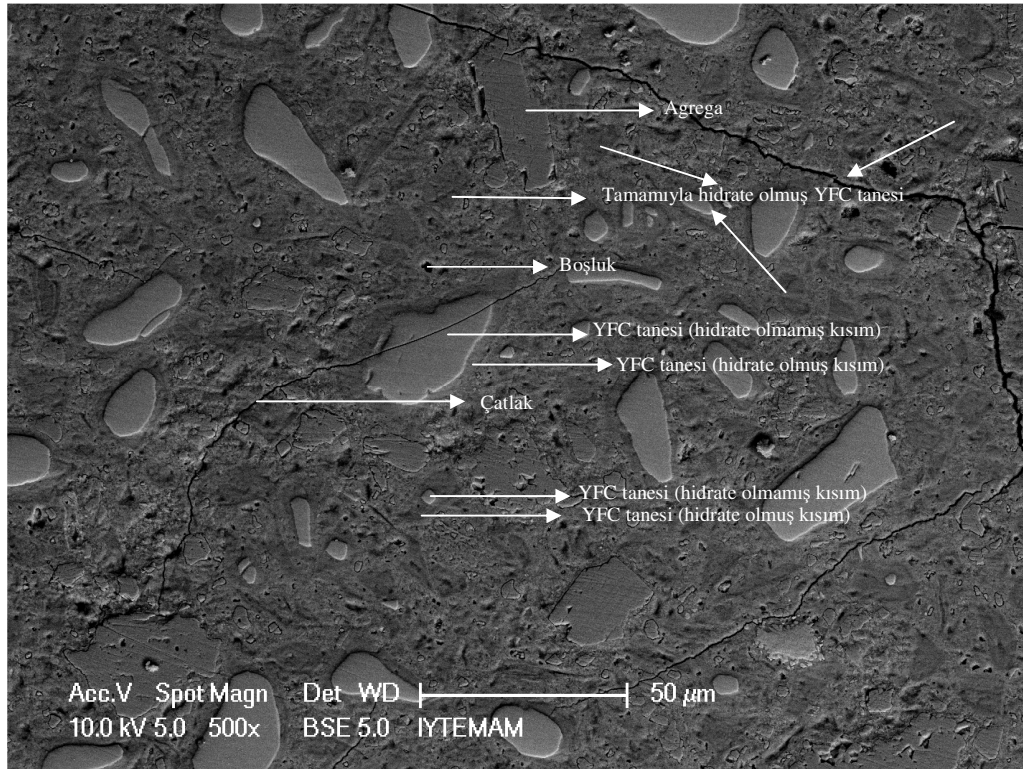
Element	2/0		2/1,2		6/0		6/0,4		6/1,2	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
C	4.43	3.50	6.49	8.16	5.57	7.24	6.60	6.84	7.02	9.38
O	36.10	31.19	36.41	39.55	32.61	27.62	41.64	35.10	41.07	39.31
Fe	4.21	3.32	4.82	4.99	3.22	2.69	5.05	3.75	2.65	5.60
Na	3.46	2.08	2.91	2.59	4.49	2.76	6.28	4.74	5.56	4.99
Mg	6.26	1.38	5.63	1.61	2.87	2.25	1.63	1.96	3.10	3.40
Al	5.96	5.37	5.83	4.14	5.28	5.26	5.02	5.53	4.66	4.44
Si	17.62	22.52	18.80	16.70	16.84	18.08	16.12	18.34	18.05	15.77
S	1.41	0.83	0.92	0.73	0.73	0.54	0.66	0.46	0.63	0.68
Cl	0.32	0.23	0.13	0.25	0.24	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
K	1.43	1.46	1.48	1.40	1.40	1.28	0.78	1.27	0.79	0.81
Ca	18.79	28.12	16.57	19.88	26.74	32.28	16.22	22.03	16.28	15.61
Ca/Si	1.07	1.25	0.88	1.19	1.59	1.79	1.01	1.20	0.90	0.99



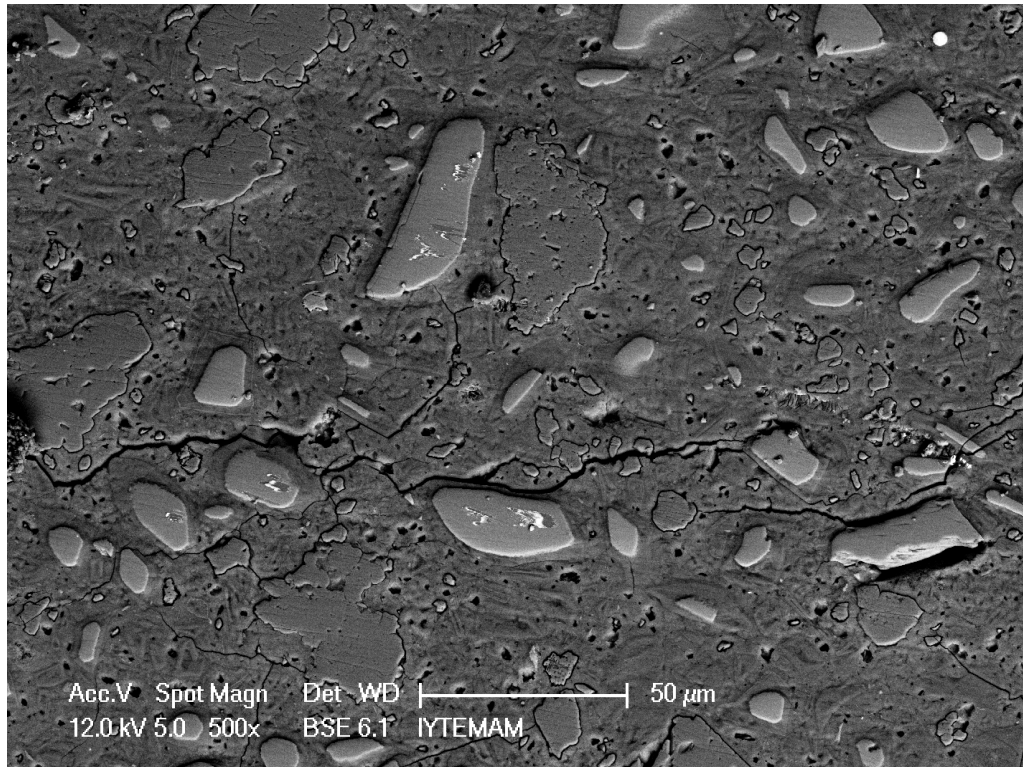
Şekil 6.67 SEM (BSE), otoklav kürü %2 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı.



Şekil 6.68 SEM (BSE), otoklav kürü %2 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı.

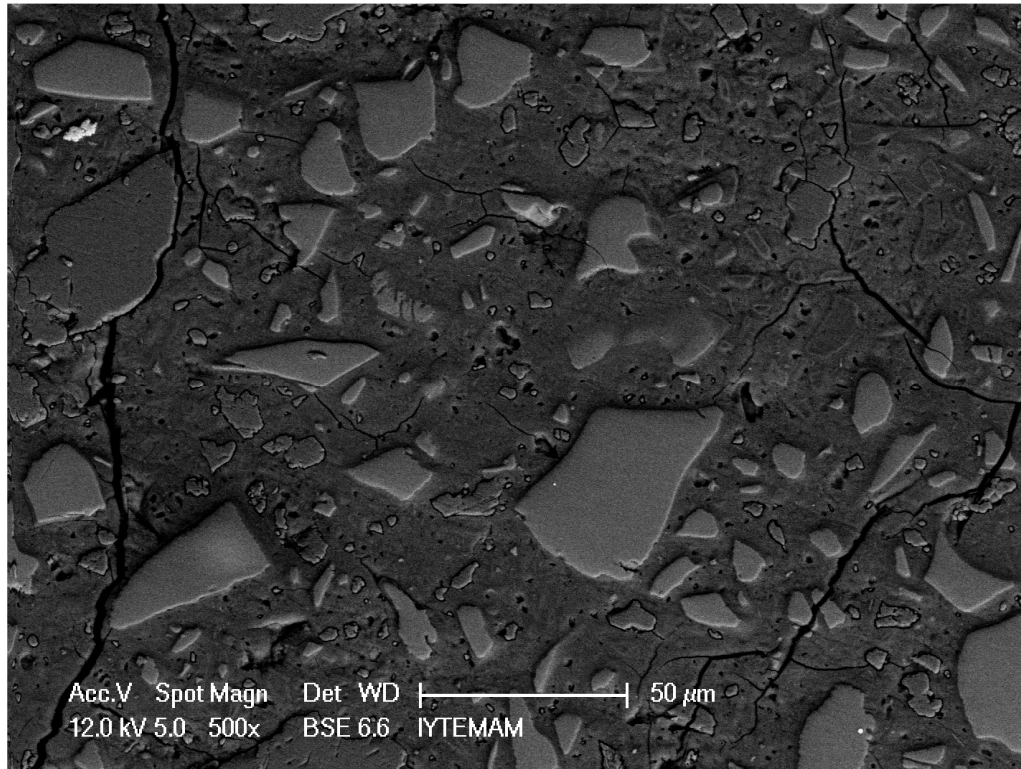


Şekil 6.69 SEM (BSE), otoklav kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 harcı.



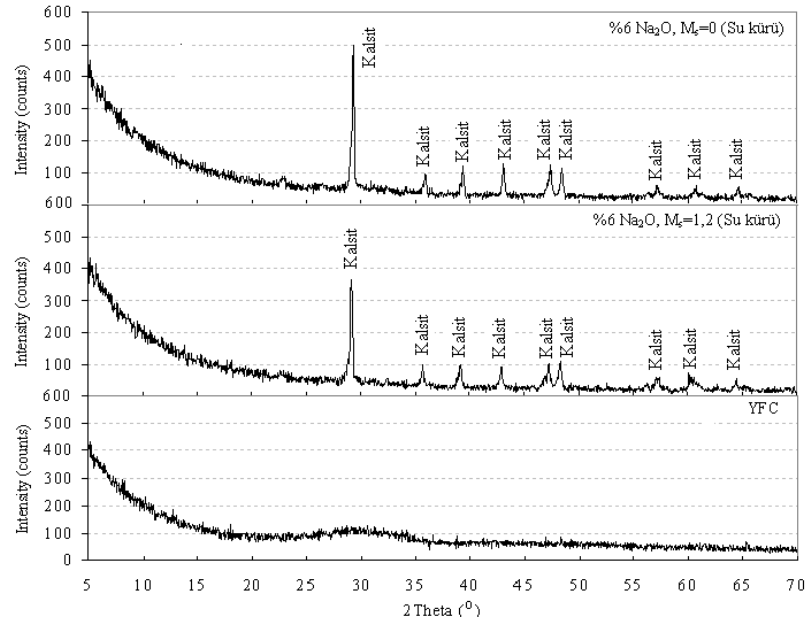
Şekil 6.70 SEM (BSE), otoklav kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0,4 harcı.



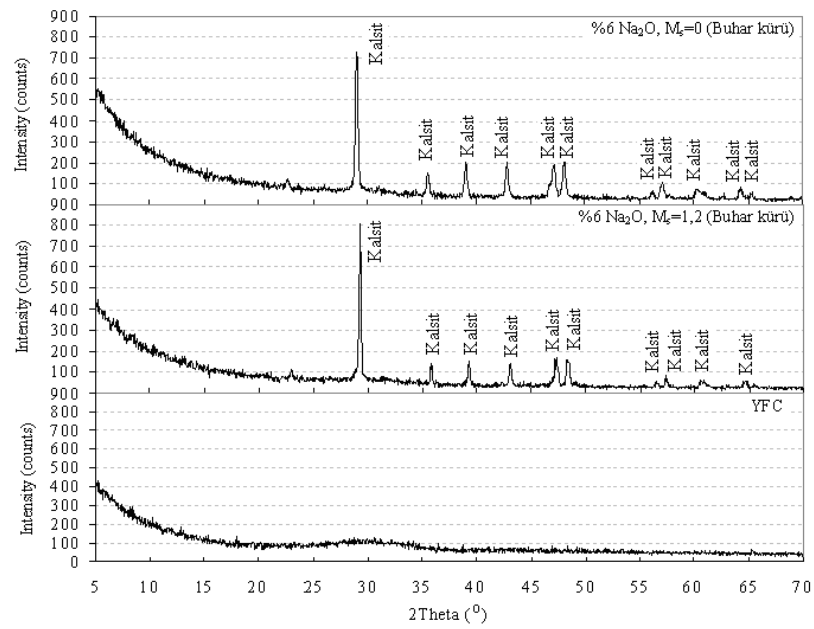


Şekil 6.71 SEM (BSE), otoklav kürü %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 harcı.

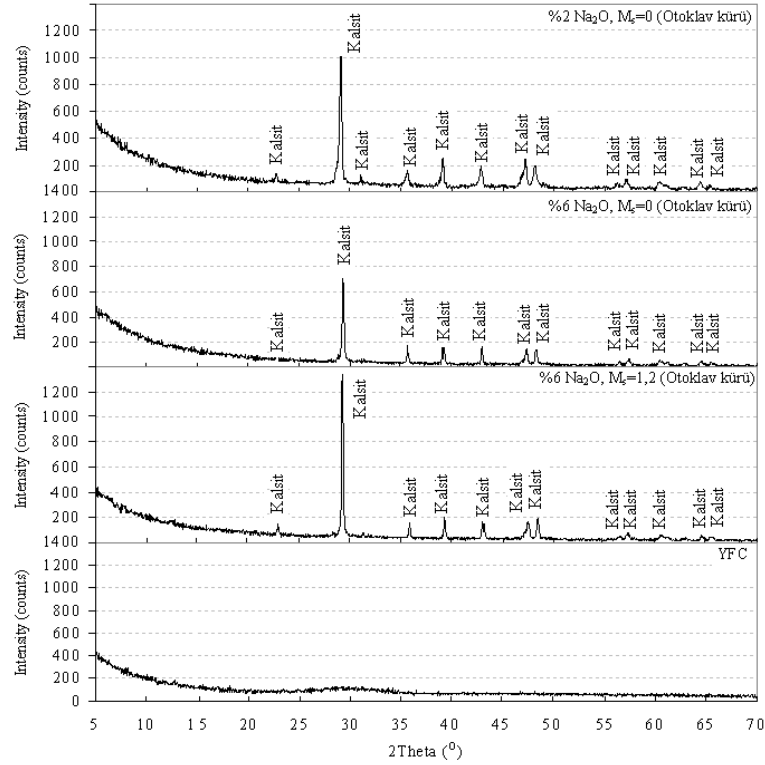
XRD analizleri standart su kürü (28 gün), buhar kürü ve otoklav kürü geçirmiş %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 0 ve 1,2 olan harçlar ve %2 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 0 olan otoklav kürü geçirmiş harç karışımı üzerinde yapılmıştır. Standart su kürü, buhar kürü ve otoklav kürü için XRD analizleri sırasıyla Şekil 6.72, 73 ve 74'te verilmiştir. Karışımdan ve kür yönteminden bağımsız olarak kalsit dışında bir kristal yapı tespit edilememiştir. Kalsit agrega olarak kullanılan kireçtaşı agregasının yapısını oluşturmaktadır. Bu durum, AA harçların hamur kısmının XRD' de amorf olduğunu göstermektedir. Pacheco-Torgal, Castro-Gomes ve Jalali (2008b) tarafından da bu durum rapor edilmiştir.



Şekil 6.72 Standart su kuru geçirmiş AAH'nin ve YFC'nin XRD grafiği.



Şekil 6.73 Buhar kuru geçirmiş AAH'nin ve YFC'nin XRD grafiği.



Şekil 6.74 Otoklav kürü geçirmiş AAH'nin ve YFC'nin XRD grafiği.

Cıva porozimetresi deneyi, %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 0 ve 1,2 olan, standart su kürü (28 gün), buhar kürü ve otoklav kürü geçirmiş harçlar üzerinde yapılmıştır. Ayrıca, %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 0,4 olan standart su kürüne maruz kalmış ve %2 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 0 olan otoklav kürü geçirmiş harçlar üzerinde de yapılmıştır. Karışımların poroziteleri ve boşluk dağılımları belirlenmiştir. Bu çalışmanın yaptırılmasının nedeni boşluk miktarı ve yapısı hakkında SEM analizleri ile sayısal bir veri elde edilememesidir. SEM analizinden sonra boşluk miktarı için görüntü analizi yapılabilmektedir. Ancak, bu analiz iki boyutlu fotoğraflarla yapılmakta olup birçok kabule dayanmaktadır. Bu nedenle üç boyutlu gerçek boşluk miktarını tahminde yetersiz kalmaktadır.

Toplam porozitedeki değişimden daha ziyade, önemli olan boşluk boyutu ve boşlukların birbiri ile bağlantısıdır. Mekanik özellikler, geçirimsizlik, büzülme karakteristikleri gibi özellikler toplam poroziteden çok boşluk boyutu ve dağılımı ile ilgilidir. International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) boşluk

boyutunu Tablo 6.12'deki gibi sınıflandırmıştır. Kapiler boşluklar, makro ve mezo boyutlu boşluklardan oluşmakta olup, orijinal çimento taneleri arasındaki suyla dolu boşluklardır. Mikro boşluklar ise C-S-H jelinin bir kısmını oluşturmaktadır. Büzülme, mezo boşluklardan su kaybına ve makro boşlukların boyutuna bağlıdır. Makro boşlukların boyutu mezo boşluklardan suyun ne kadar kolay buharlaşabileceğini belirlemesi bakımından önemlidir.

Tablo 6.12 IUPAC boşluk boyutu sınıflandırması

<b>Boşluk tanımı</b>	<b>Yarıçap (nm)</b>
Mikro boşluk	<1,25
Mezo boşluk	1,25-25
Makro boşluk	25-5000
Sürüklenmiş ve hapsolmuş boşluklar ve önceden var olan mikro çatlaklar	5000-50000

Dayanımı etkileyen boşluklar, çapı 0,1  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük olan boşluklar iken, geçirimsizliği etkileyen boşluklar, çapı 1,3  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük olan boşluklardır.

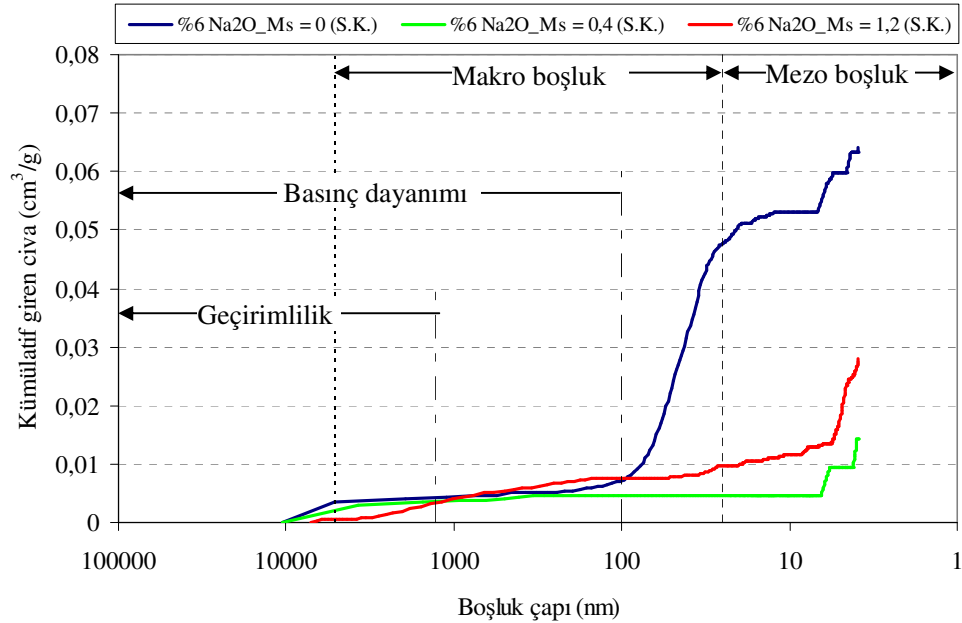
Şekil 6.75-77 arasında karışıma bağlı olarak ve Şekil 6.78-79'da ise kür tipine bağlı olarak boşluk boyut dağılımı verilmiştir. Literatürde verilen kritik boşluk boyutları için giren cıva hacmi ise Tablo 6.13'te verilmiştir.

Tablo 6.13 Kritik boşluk çapları için giren cıva miktarı ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )

<b>Karışım</b>	<b>Boşluk çapı</b>			
	<b>5000-25 nm</b>	<b>25 nm&gt;</b>	<b>&gt;1300 nm</b>	<b>&gt;100 nm</b>
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=0$ (S.K.)	0,0439 (%69)*	0,0166 (%26)	0,0042 (%7)	0,0070 (%11)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=0,4$ (S.K.)	0,0027 (%18)	0,0095 (%67)	0,0038 (%27)	0,0047 (%33)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=1,2$ (S.K.)	0,0092 (%32)	0,0184 (%66)	0,0033 (%12)	0,0076 (%27)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=0$ (B.K.)	0,0477(%61)	0,0212 (%27)	0,0122 (%16)	0,0235 (%30)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=1,2$ (B.K.)	0,0039 (%11)	0,0204 (%74)	0,0062 (%21)	0,0079 (%27)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=0$ (O.K.)	0,0068 (%9)	0,0180 (%91)	0,0002 (%1)	0,0025 (%10)
%6 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=1,2$ (O.K.)	0,0075 (%20)	0,0295 (%73)	0,005 (%13)	0,0067 (%17)
%2 $\text{Na}_2\text{O}-\text{M}_s=0$ (O.K.)	0,0065 (%12)	0,0148 (%86)	0,0018 (%7)	0,0048 (%19)

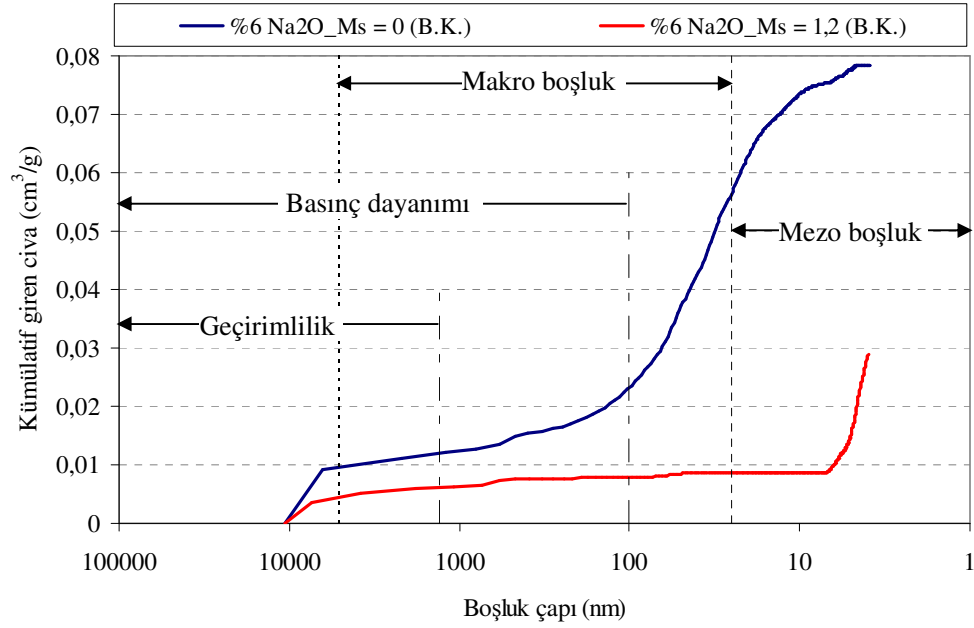
\*Parantez içindeki değerler ilgili karışımın toplam porozitesinin ne kadarının ilgili boşluk aralığında olduğunu gösterir.

Standart kür geçirmiş karışımların boşluk boyut dağılımı Şekil 6.75'te görülmektedir.  $M_s=0$  durumunda mezo boşluklar toplam porozitenin %26'sını oluşturmaktadır. Diğer  $M_s$  değerlerinde ise bu değer %66-67 değerine karşılık gelmektedir. Ancak,  $M_s=0$  iken boşlukların %26'sı mezo boşluk olsa da, boşlukların %67'sinin mezo boşluk olduğu  $M_s=0,4$ 'e kıyasla daha fazla mezo boşluğa sahiptir. Çünkü  $M_s=0$  karışımının toplam porozitesi diğer karışımlara kıyasla oldukça yüksektir. Bu bakımdan kıyaslanmanın giren cıva hacmi dikkate alınarak yapılması daha doğru olacaktır. Giren cıva hacmi toplam poroziteden bağımsız olarak ilgili aralıktaki boşlukları doldurabilmek için gerekli cıva hacmini, bir başka deyişle ilgili aralıktaki boşlukların hacmini vermektedir. En yüksek mezo boşluk hacmi  $M_s=1,2$ , en düşük cıva hacmi ise  $M_s=0,4$  karışımında elde edilmiştir. Bölüm 6.4'te sunulduğu gibi,  $M_s=0,4$  karışımının büzülmesi  $M_s=0$  karışımına kıyasla daha yüksektir. Bu durumda,  $M_s=0,4$  karışımında mezo boşluk hacminin daha fazla olması beklenirdi. Bu oluşan jelin özelliklerinin de büzülme üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu kanıtlamaktadır. Wittmann (1982) ve Young (1988) da boşluk boyutu dağılımının ve C-S-H jelinin özelliklerinin kuruma büzülmesinin büyüklüğü üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu göstermiştir. SEM incelemelerinden de hatırlanacağı üzere,  $M_s=0,4$  ve 1,2 karışımlarının C-S-H jeli morfolojisi benzer olup,  $M_s=0$  durumunda önemli ölçüde farklıdır. Benzer C-S-H jeli morfolojisine sahip olan  $M_s=0,4$  ve 1,2 için,  $M_s=1,2$  durumunda oluşan daha fazla büzülme mezo boşluk hacminin daha fazla olması ile açıklanabilir. Dayanım açısından bakıldığında, en düşük dayanımın elde edildiği  $M_s=0$  karışımının 100 nm den büyük boşluklarının miktarının, en yüksek dayanımın elde edildiği  $M_s=1,2$  ile benzer olduğu ve  $M_s=0,4$ 'ten daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, daha düşük çaplı boşluklarında AAH'ın dayanımını etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, jel morfolojinin de dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır. Bu nedenle, sadece boşluk çapının değişimiyle mekanik özellikleri bağdaştırmaya çalışmak pek doğru değildir. Bölüm 6.5'te verilen veriler, standart su kürü geçirmiş numunelerde geçirimsizliğin  $M_s=0$  durumunda  $M_s=1,2$ 'ye göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Geçirimsizliği etkileyen boşluk (>1300 nm) hacimleri incelendiğinde, sonuçların birbirini desteklediği görülmektedir.



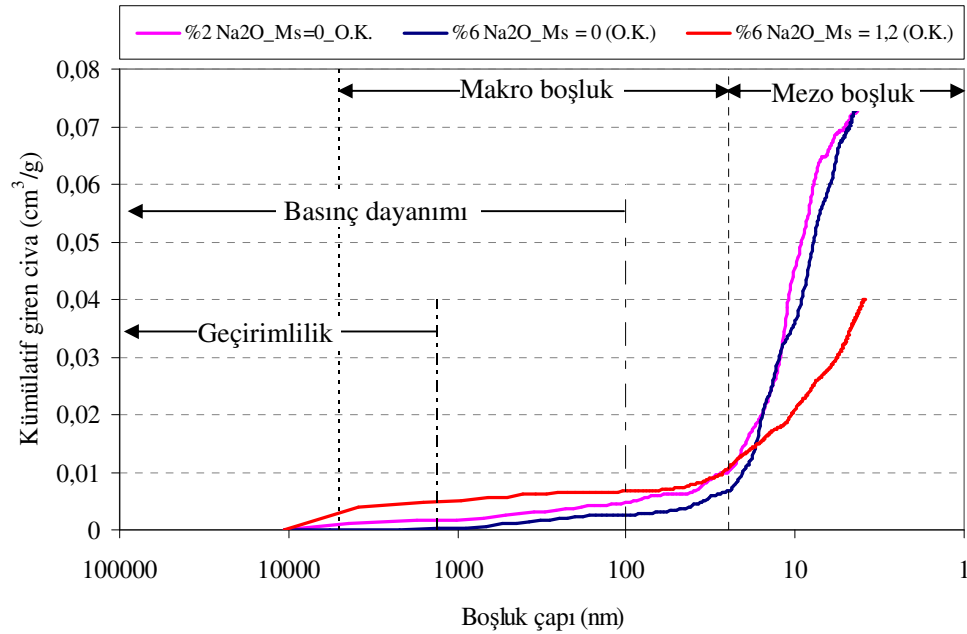
Şekil 6.75 Standart su kuru geçirilmiş AAH'nin boşluk boyutu dağılımı ve etkileri.

Buhar kuru geçirilmiş karışımların boşluk boyut dağılımı Şekil 6.76'da verilmiştir.  $M_s=1,2$  karışımının daha ince bir boşluk boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Bu karışım için, 100 nm'den büyük boşlukların daha az miktarda olduğu görülmektedir. Bu durum, basınç dayanımı verilerini doğrular niteliktedir. Bölüm 6.5'te verilen veriler, buhar kuru geçirilmiş numunelerde geçirimsizliğin  $M_s=0$  durumunda  $M_s=1,2$ 'ye göre daha fazla olduğunu göstermiştir. Geçirimsizliği etkileyen boşluk (>1300 nm) hacimleri incelendiğinde, standart kuru durumunda olduğu gibi sonuçlar birbirini desteklemektedir.



Şekil 6.76 Buhar kürü geçirmiş AAH'ın boşluk boyutu dağılımı ve etkileri.

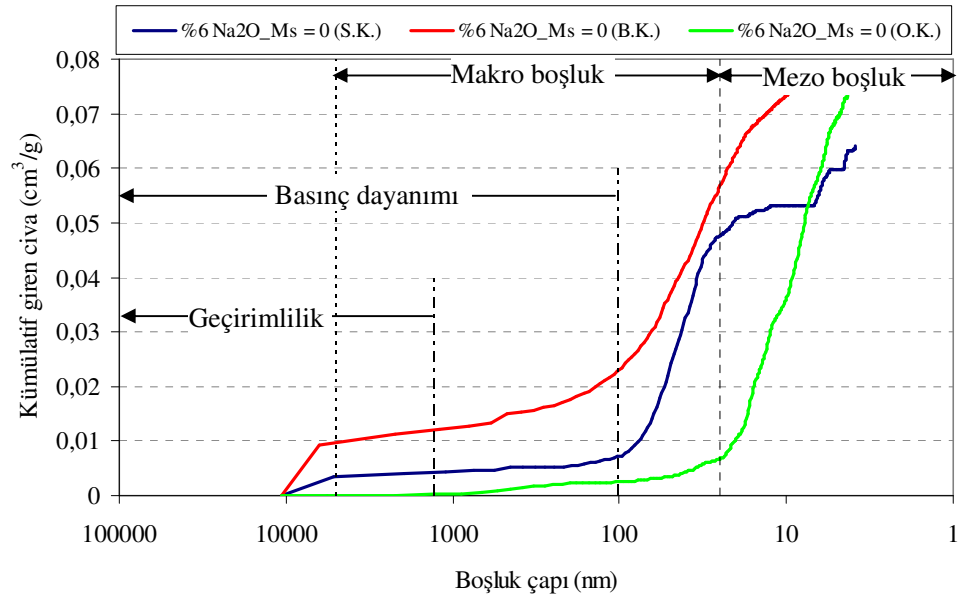
Otoklav kürü geçirmiş karışımların boşluk boyut dağılımı Şekil 6.77'de verilmiştir.  $M_s=0$  için %2 ve %6  $\text{Na}_2\text{O}$  oranlarında boşluk boyutu dağılımlarının oldukça benzer olduğu görülmektedir. Bu durum, boşluk boyutu dağılımının  $\text{Na}_2\text{O}$  oranından bağımsız olduğuna işaret etmektedir.  $M_s=1,2$  karışımı diğer karışımlara kıyasla daha fazla makro boşluk, daha az mezo boşluk içermektedir. Ancak 100 nm'den büyük boşlukların miktarı diğer karışımlarla oldukça benzerdir. Bu durum, benzer basınç dayanımını sahip olan bu karışımların mekanik deney sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 6.77 Otoklav kürü geçirmiş AAH'ın boşluk boyutu dağılımı ve etkileri.

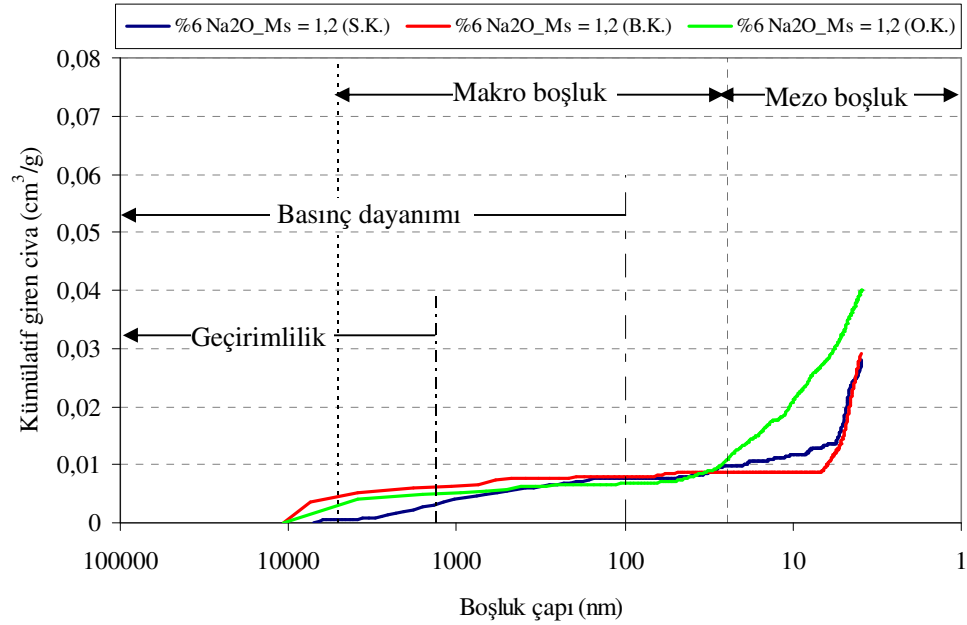
Şekil 6.78'de %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri sıfır olan karışımların kür yöntemine bağlı olarak boşluk boyutu dağılımları sunulmuştur. Buhar kürü uygulaması standart küre kıyasla 100 nm'nin üzerindeki kaba boşlukların artmasına neden olmuştur. Otoklav kürü ise, 25 nm'nin üzerindeki boşlukları önemli derecede azaltmış ve boşlukların çok büyük bir kısmının mezo boşluklara dönüşümünü sağlamıştır. Otoklav kürü uygulaması ile dayanımda görülen artışa boşluk boyutu dağılımında oluşan bu değişimin önemli bir katkı sağladığı düşünülmektedir.





Şekil 6.78 %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0 olan AAH'nin çeşitli kür koşullarında boşluk boyutu dağılımı ve etkileri.

Şekil 6.79'da %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub>=1,2 olan karışımların kür yöntemine bağlı olarak boşluk boyutu dağılımları sunulmuştur. Eğrilerde ilk dikkati çeken karakteristik boşluk boyutu dağılımındaki süreksizliktir. Standart kür durumunda, 50-150 nm, buhar kürü durumunda 7-50 nm ve 70-470 nm, otoklav küründe ise 60-200 nm arasında neredeyse boşluk yoktur. Shi (1996) oda sıcaklığında nemli ortamda kür edilen PÇ harçlarının 5 ile 1200 nm arasında sürekli bir boşluk boyutu dağılımına sahip olduğunu, cam suyu ile aktive edilmiş harçlardaki boşlukların ise, 10 nm'den daha düşük çaplı veya 200 nm'den daha büyük çaplı olduğunu bildirmiştir. Boşluk boyut dağılımlarının M<sub>s</sub>=0 durumundakinin aksine, üç kür durumu için birbirine oldukça benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 6.79 %6 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=1,2 olan AAH'ın çeşitli kür koşullarında boşluk boyutu dağılımı ve etkileri.

Bölüm 6.4'te daha önce verildiği gibi, %6 Na<sub>2</sub>O, M<sub>s</sub>=1,2 karışımı üzerinde yapılan deneyler ısıtma işlemi uygulanması ile özellikle de otoklav kürü ile, kuruma büzülmesinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Tablo 6.13 incelendiğinde, en fazla mezo boşluğun sırasıyla otoklav, buhar ve standart kürde olduğu görülmektedir. Bir başka deyiş ile, mezo boşluk miktarındaki değişim ile büzülme verileri birbirini doğrulamamaktadır. Isıtma işlemi uygulanması ile büzülmede oluşan azalma, Bakharev, Sanjayan ve Cheng (1999b) tarafından da rapor edilmiş olup, bu durum yüksek kür sıcaklıklarında oluşan C-S-H'nin daha düşük su içeriğine sahip olmasına bağlanmıştır.

## 6.7 Birinci Aşama Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu bölümde, %2, %4, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında, M<sub>s</sub> oranındaki değişimin işlenebilirlik, priz süresi, mekanik özellikler (standart su kürü, buhar kürü ve otoklav kürü), su emme karakteristikleri ve içyapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. İşlenebilirlik ve priz süreleri bakımından değerlendirildiğinde, %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında ara M<sub>s</sub> değerlerinin (0,4 ve 0,8) hızlı işlenebilirlik kaybı ve düşük priz süreleri nedeniyle şantiye koşulları için uygun olmayacağı görülmüştür. Bununla birlikte, bu karışımların hızlı priz sürelerine ihtiyaç duyulan işlerde, örneğin püskürtme beton uygulamalarında kullanım olanakları bulabileceği düşünülmektedir.
2. Standart su kürü durumunda,
  - Alkalilerle aktive edilmiş harçların erken dayanımının (ilk 7 gün) PÇ harçlarına kıyasla daha düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu görülmüştür.
  - Suda çözünen %2 Na<sub>2</sub>O serisi tüm M<sub>s</sub> oranlarında, %4 Na<sub>2</sub>O serisi yüksek M<sub>s</sub> oranlarında (1,2 ve 1,6) ve M<sub>s</sub>=0 (tüm Na<sub>2</sub>O oranlarında) olan harç karışımlarının mekanik özellikleri oldukça düşük olup, kullanımları uygun değildir.
  - M<sub>s</sub>=0 olan harç karışımları dışındaki tüm karışımların kuruma büzülmesi değerleri PÇ harçlarından ve literatürde belirtilen sınırlardan yüksektir.
  - Su emme karakteristikleri bakımından en uygun sonuçlar 0,8 civarındaki M<sub>s</sub> değerlerinde elde edilmiştir.
  - Bu değerlendirmeler ışığında, standart kür durumunda kullanıma uygunluk açısından ortak bir kesişim kümesinin oluşmadığı görülmektedir. Bazı karışımlar işlenebilirlik, bazıları priz süresi, bazıları dayanım, bazıları ise kuruma büzülmesi karakteristikleri açısından PÇ harçlarından daha kötü performans sunmuştur. Bu nedenle, standart su kürü durumunda AAH'ların kullanımının uygun olmayacağı görülmüştür.

3. Isıl işlem uygulanması ile kuruma büzülmesi değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Otoklav kürü uygulaması ile yüksek kuruma büzülmesi sorunu tamamıyla ortadan kalkmıştır.
4. Buhar kürü uygulanması durumunda, %2 Na<sub>2</sub>O oranında yüksek M<sub>s</sub> değerlerinde (1,2 ve 1,6), diğer Na<sub>2</sub>O oranlarında ise M<sub>s</sub> değerinin 0,4 ve üzerinde olduğu durumlarda mekanik özellikler bakımından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Otoklav küründe ise tüm karışımlar mükemmel bir dayanım performansı sergilemiş olup, çok düşük miktarlarda aktivatör kullanılarak (%2 Na<sub>2</sub>O ve M<sub>s</sub>=0) 70 MPa seviyelerinde dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Buhar kürünün M<sub>s</sub> değeri 0,8'in üzerine çıktığında otoklav kürüne kıyasla daha iyi mekanik özellikler sunabildiği görülmüştür. Bir başka deyişle, alkalilerle aktive edilmiş YFC harç ve betonlarının üretiminde kür yönteminin ve aktivatör kompozisyonun seçimi iyi bir fizibilite çalışması gerektirmektedir.

## BÖLÜM YEDİ

### II. AŞAMA – KARIŞIM ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

#### 7.1 Amaç

Çalışmanın I. Aşamasında yapılan deneyler mekanik özellikler açısından genellikle en iyi sonucun %6 Na<sub>2</sub>O içeren ve M<sub>s</sub> değeri 1,2 olan karışımdan elde edildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, bu karışımın kuruma büzülmesi değerleri standart kür ve buhar kürü durumlarında oldukça yüksek mertebelindedir. Bu bölümde, çeşitli mineral ve kimyasal katkıları kullanılarak, kuruma büzülmesi azaltılmaya, basınç dayanımı ise artırılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, RPC özellikleri taşıyan kompozitlerin üretiminin mümkün olacağını göstermiş ve çalışma programı bu yönde devam etmiştir.

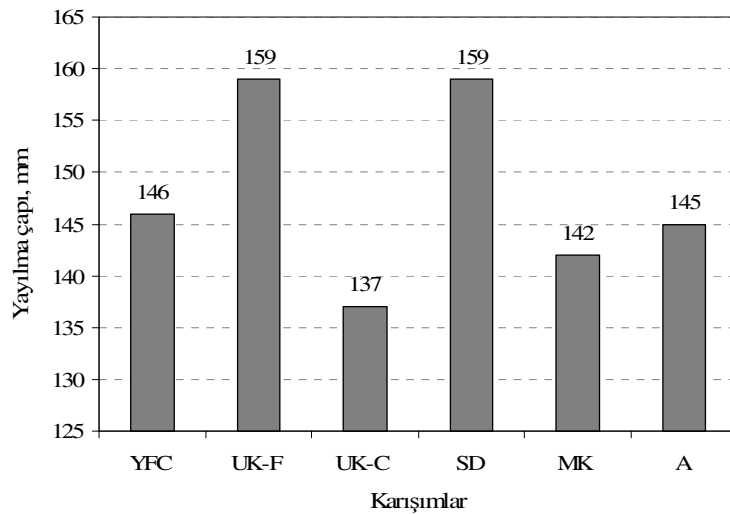
RPC türü yüksek dayanımlı betonlar, uzun servis ömrü ve dışarıdan gelecek fiziksel, kimyasal, biyolojik etkilere karşı yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren yapılarda, örneğin nükleer atıkların depolanmasında, çok etkin ve verimli çözümler sunmaktadır. Bu nedenle, Avrupa’da birçok projede RPC, izolasyon ve nükleer atıkların depolanmasında kullanılmaktadır. Yüksek dayanım ve dayanıklılığın gerektiği yapılarda, örneğin Kanada’daki Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsünün imalatında bu tür betonlar kullanılmıştır (Matte ve Moranville, 1999; Blais ve Couture, 1999). Bu kompozitlerin güçlendirme elemanı olarak kullanımında oldukça iyi sonuçlar rapor edilmiştir (Alaee, 2002). Ülkemizde ise İstanbul Teknik Üniversitesi – İSTON firması ortak çalışması ile RPC’den yağmur suyu ızgarası ve rögar kapakları üretimi gerçekleştirilmiş olup, bu ürünler ticari ürün olarak kullanılmaktadır. Gelecekte daha fazla kullanım alanı bulması beklenen bu özel betonun kullanımındaki en önemli sıkıntı ise, fiyatının geleneksel betonlara kıyasla daha fazla olmasıdır. Çünkü RPC’de geleneksel betonun düşük maliyetli bileşenleri yerine daha pahalı malzemeler kullanılmakta olup, maliyeti yüksek performanslı betonlara kıyasla 5 ile 10 kat daha fazladır. Yüksek maliyet, yüksek dozajda silis dumanı, çimento, akışkanlaştırıcı katkı ve çelik lif kullanımından kaynaklanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında, çimento yerine YFC kullanılarak, akışkanlaştırıcı katkı kullanmaksızın daha ekonomik bir karışım üretilmesi amaçlanmıştır.

## 7.2 Mineral Katkı ve Alçı Etkisi

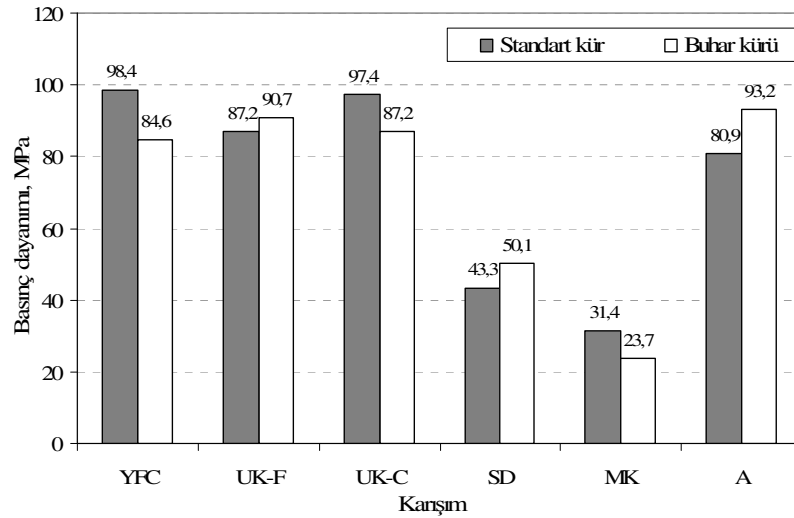
Bu bölümde YFC yerine belli oranda F ve C sınıfı uçucu kül (UK), metakaolin (MK), silis dumanı (SD) ve alçı (A) kullanımının etkisi incelenmiştir. Alçı %2, diğer katkıları ise %20 oranında YFC yerine ikame edilmiştir. Kullanılan oranlar literatürden yararlanılarak ön deneylerle belirlenmiştir. Karışımların su/bağlayıcı oranı 0,40'tır. Agrega olarak tüm karışımlarda kireçtaşı kullanılmıştır. Basınç dayanımı 50 mm ayrıtlı küp numuneler üzerinde, standart kür durumunda 28. günde, buhar kürü durumunda ise kür işleminin ardından numune sıcaklığı ortam sıcaklığına düştükten sonra belirlenmiştir.

Şekil 7.1'de yayılma çapının mineral katkı ve alçı ikamesiyle değişimi verilmiştir. Şekil 7.1'den görüldüğü gibi, YFC yerine F tipi UK ve SD ikamesi yayılma çapını arttırmıştır. Bu iki karışım için de, 159 mm yayılma çapı elde edilmesine rağmen, SD ikamesi yapılan karışım daha işlenebilir bir karışım mahiyetindedir. Alçı ikamesi işlenebilirliği etkilemezken, MK ve C tipi UK ikamesi işlenebilirlikte azalma yaratmıştır. Ayrıca, C tipi UK kullanımı işlenebilirlik kaybını da önemli ölçüde arttırmıştır.

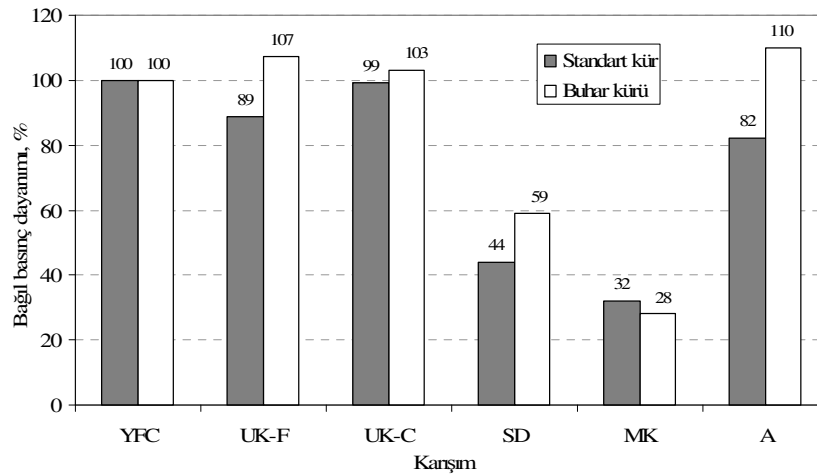


Şekil 7.1 YFC yerine çeşitli toz katkıların ikamesinin işlenebilirliğe etkisi.

YFC yerine mineral katkı ve alçı ikamesinin basınç dayanımına etkisi Şekil 7.2’de, bağıl basınç dayanımına etkisi ise Şekil 7.3’te verilmiştir. Görüldüğü gibi, standart kür durumunda YFC yerine, %20 oranında C sınıfı UK ikamesi dayanımda herhangi bir azalmaya yol açmazken, F sınıfı UK ikamesi %11 dayanım kaybına yol açmaktadır. Silis dumanı ve metakaolin ikamesi ise, dayanımda sırasıyla %56 ve %68 oranında azalmaya yol açmıştır. Buhar kürü durumunda, mineral katkıların dayanım açısından yararlı etkisi daha fazladır. UK (F ve C tipi) ve alçı ikamesi dayanımda artış sağlarken, SD ve MK ikamesi standart kürde olduğu gibi dayanımda azalmaya neden olmuştur.

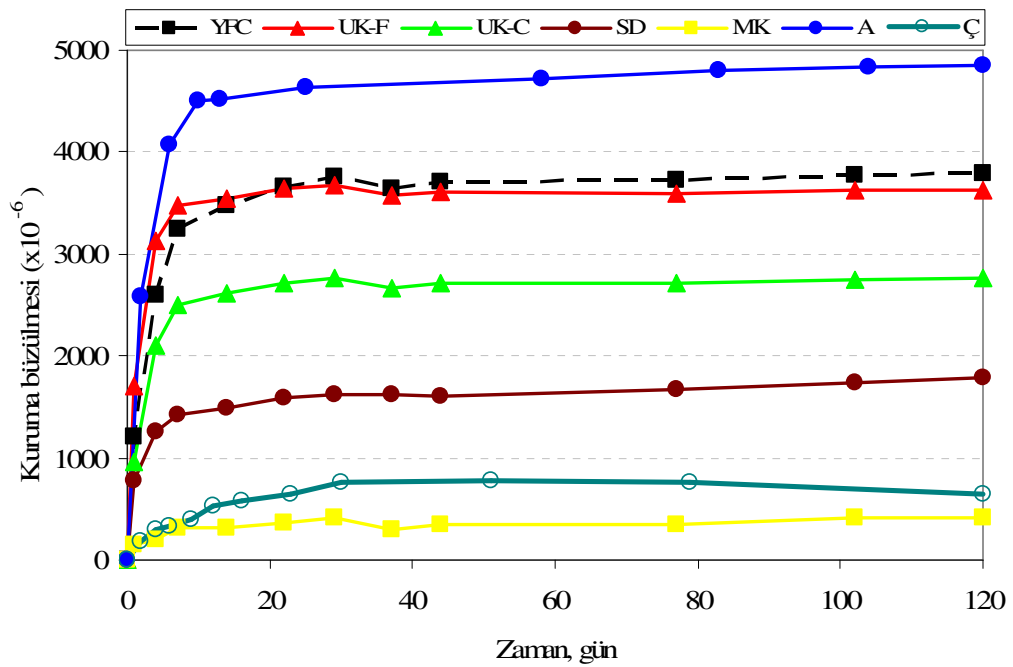


Şekil 7.2 YFC yerine çeşitli toz katkıların ikamesinin basınç dayanımına etkisi.



Şekil 7.3 YFC yerine çeşitli toz katkıların ikamesinin bağıl basınç dayanımına etkisi.

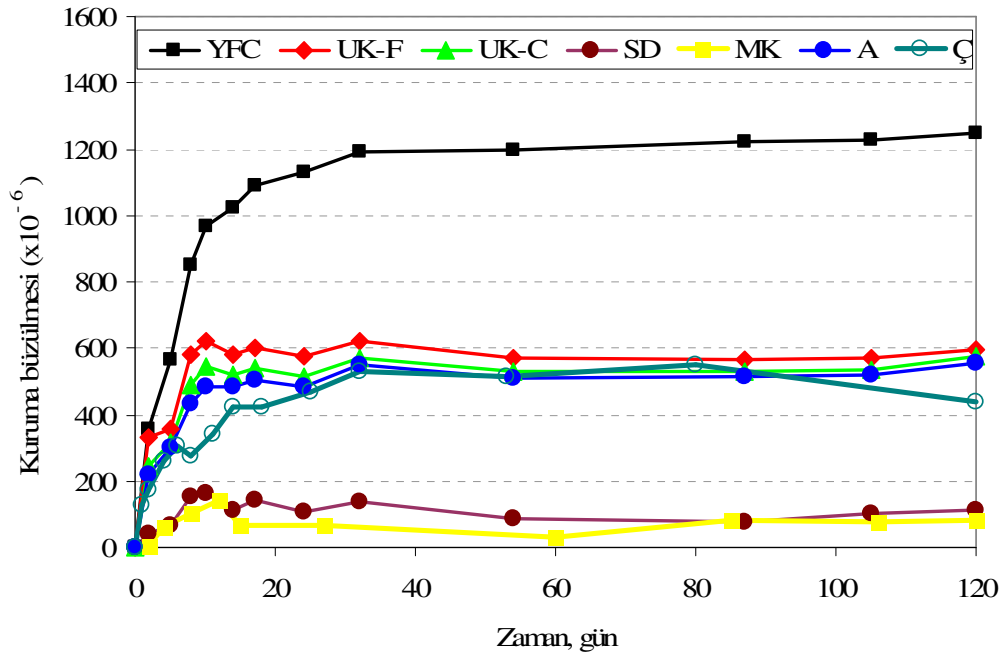
Şekil 7.4'te herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmamış harç karışımlarında mineral katkı ve alçı ikamesiyle zamanla oluşan büzülme gelişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, alçı ikamesi büzülmeyi arttırırken, F sınıfı UK büzülme davranışını olumlu ya da olumsuz yönde etkilememiştir. C sınıfı UK, SD ve MK ise büzülme değerlerini önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle, MK kullanımı ile büzülme değerleri ihmal edilebilecek mertebeye azalmıştır. Ancak, daha öncede açıklandığı gibi MK ikamesi dayanımda %68 gibi çok büyük bir oranda azalmaya yol açmaktadır. Ayrıca işlenebilirlik de MK ikamesinden olumsuz etkilenmiştir.



Şekil 7.4 YFC yerine çeşitli toz katkıların ikamesinin kuruma büzülmesine etkisi (Standart su kürü).

Şekil 7.5'te buhar kürü geçirmiş harç karışımlarında mineral katkı ve alçı ikamesiyle zamanla oluşan büzülme gelişimi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, tüm katkı maddeleri büzülmede azalma sağlamıştır. UK (C ve F sınıfı) ve alçı ikamesi büzülmeyi yaklaşık olarak %50 oranında azaltırken, SD ve MK ikamesi ile büzülme değerleri çok daha çarpıcı bir şekilde azalmıştır. Sonuç olarak, F ve C tipi UK veya alçı ikamesi ile buhar kürü durumunda PÇ bağlayıcılı kontrol karışımına yakın mertebelerde büzülme gösteren harçların üretimi gerçekleştirilebilmiştir. SD ve MK ikamesi durumunda ise, Portland çimentolu karışıma kıyasla çok daha fazla boyutsal stabiliteye sahip harçların üretilebileceği görülmüştür.





Şekil 7.5 YFC yerine çeşitli toz katkıların ikamesinin kuruma büzülmesine etkisi (Buhar kücü).

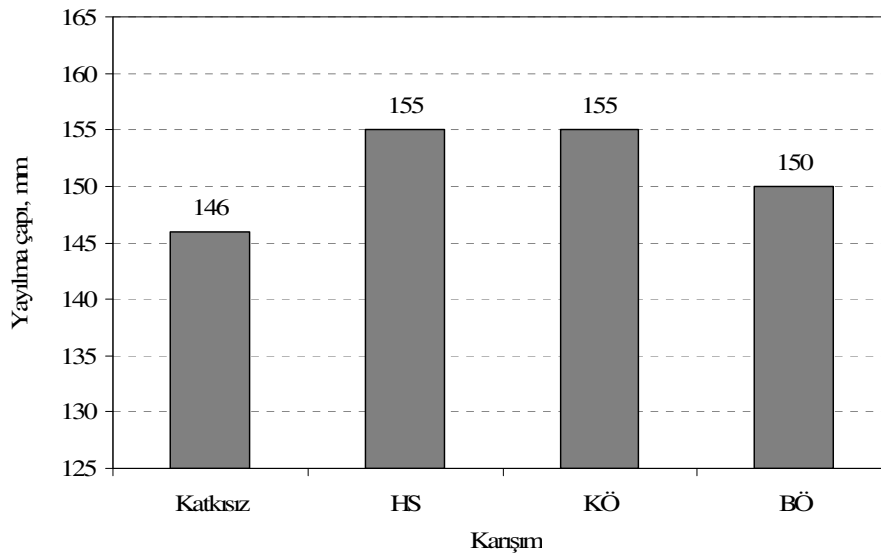
Sonuç olarak, YFC yerine belirli oranda silis dumanı kullanımı, dayanımda yarattığı azalmaya rağmen, işlenebilirlik ve kuruma büzülmesi üzerindeki mükemmel olumlu etkilerinden dolayı, potansiyel olarak uygun gibi görünmektedir. Silis dumanı ikamesinin işlenebilirlikte yarattığı artışın, işlenebilirlik sabit tutulduğunda su/bağlayıcı oranında önemli derecede azalma sağlayacağı açıktır. Bu nedenle araştırma programının ilerleyen aşamalarına silis dumanı kullanımı da dahil edilmiştir.

### 7.3 Kimyasal Katkı Etkisi

Bu bölümde, kuruma büzülmesi sorunu mineral katkıların kullanımıyla kısmen çözülebilen, fakat çimento esaslı harca kıyasla hala daha yüksek oranda büzülme gösteren standart kür geçirmiş harçlar üzerinde kimyasal katkıları kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. Kimyasal katkı olarak, hava sürükleyici (HS), köpük önleyici (KÖ) ve büzülme önleyici (BÖ) katkıları kullanılmıştır. Karışımların basınç dayanımı, 50 mm ayrıtlı küp örnekler üzerinde belirlenmiştir. Agregası olarak tüm karışımlarda kireçtaşı agregası kullanılmıştır.

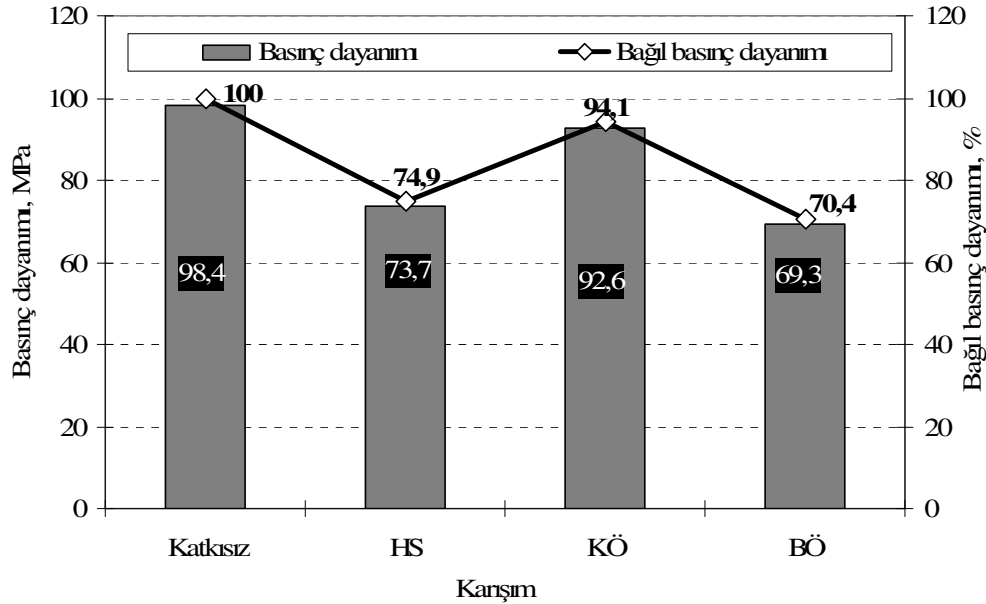
Kimyasal katkıların etkisi, %6 Na<sub>2</sub>O içeren M<sub>s</sub> değeri 1,2 olan karışım üzerinde yapılan deneylerle belirlenmiştir. Köpük önleyici katkı olarak GÜNKEM firmasından temin edilen toz haldeki AXILAT DF 770 DD, hava sürükleyici olarak sıvı formda SIKA-Aer, büzülme önleyici olarak ise sıvı formda BASF firmasının TETRAGUARD AS21 adlı kimyasal katkı maddeleri kullanılmıştır. Köpük önleyici katkı YFC'nin ağırlıkça %0,32'si oranında, hava sürükleyici katkı %0,09'u oranında ve büzülme önleyici katkı ise %2'si oranında kullanılmış olup, aktivatör çözeltisine dışarıdan ilave edilen suyun %20'si ile birlikte ilave edilmiştir. Kimyasal katkıların kullanım oranları, üretici firma tarafından önerilen kullanım dozajları ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan oranlar dikkate alınarak belirlenmiştir.

Şekil 7.6'da kimyasal katkı içermeyen bağlayıcısı YFC'den oluşan karışımla kıyaslamalı olarak, kimyasal katkı içeren karışımların yayılma çapının değişimi verilmiştir. Kullanılan kimyasal katkıların tümü yayılma çapını arttırmıştır. Bununla birlikte, hava sürükleyici ve köpük önleyici katkıların büzülme önleyici katkıya kıyasla bir miktar daha etkin gibi görünmektedir.



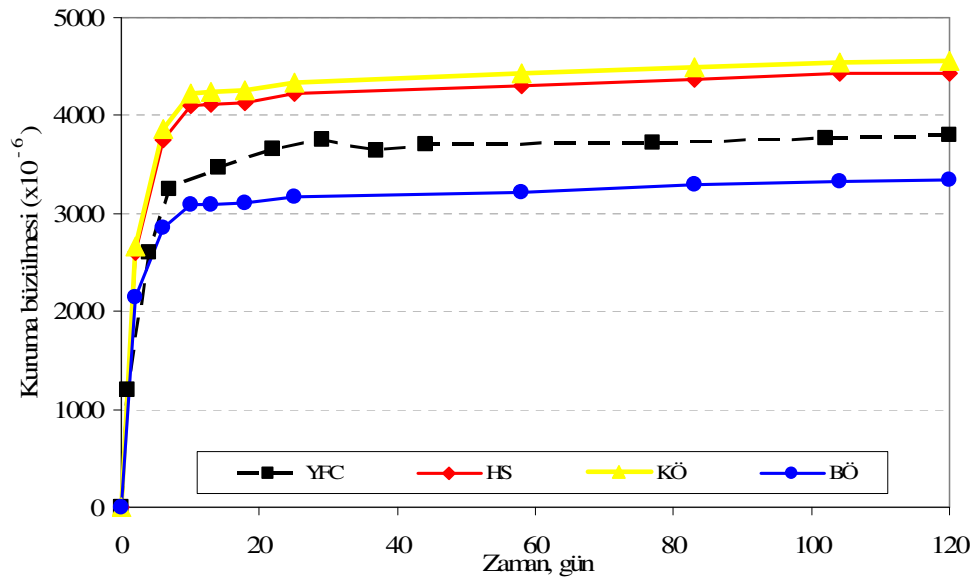
Şekil 7.6 Çeşitli kimyasal katkıların AAH'ın işlenebilirliğine etkisi.

Şekil 7.7'den görüldüğü gibi, deneylerde kullanılan tüm kimyasal katkıların dayanımında azalma yaratmıştır.



Şekil 7.7 Çeşitli kimyasal katkıların AAH'ın 28 günlük basınç dayanımına etkisi.

Şekil 7.8'de kimyasal katkı kullanımının kuruma büzülmesine etkisi verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, hava sürükleyici ve köpük önleyici katkı kuruma büzülmesini bir miktar artırırken, büzülme önleyici katkı kullanımı büzülme miktarında bir miktar azalma yaratmıştır. Bununla birlikte, büzülmedeki azalma metakaolin ve silis dumanının yarattığı etkiyle karşılaştırılamayacak kadar düşük mertebededir.



Şekil 7.8 Çeşitli kimyasal katkıların AAH'ın kuruma büzülmesine etkisi.

Kullanılan kimyasal katkıların, dayanım ve kuruma büzülmesi üzerinde yarattığı olumsuz etkilerden dolayı, çalışmanın ilerleyen aşamalarında kullanılmamasına karar verilmiştir.

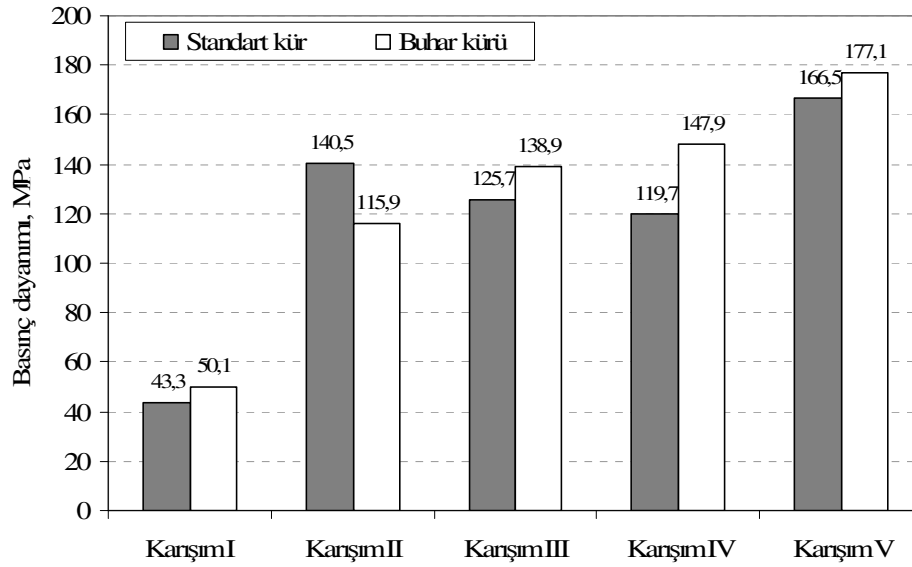
#### 7.4 Dayanım Üzerinde Etkin Parametrelerin Araştırılması

Önceki bölümde, YFC yerine %20 oranında SD ikamesinin kuruma büzülmesini önemli oranda azalttığı, buna karşılık basınç dayanımını ise önemli oranda düşürdüğü görülmüştür. SD ikamesi ile işlenebilirlikte de önemli derecede artış görülmüştür. Bu durum su miktarında azaltma yapılarak dayanım kaybı olmadan kuruma büzülmesi düşük bir ürün üretimi gerçekleştirilebileceği fikrini doğurmuştur. Bu bölümde yüksek dayanımlı ve kuruma büzülmesi kabul edilebilir limitlerin altında bir karışım üretimine yönelik olarak karışımın su/bağlayıcı oranı, agrega tipi ve agrega/bağlayıcı oranı değiştirilerek, ayrıca bir miktar çelik lif kullanılarak bu parametrelerin dayanım ve kuruma büzülmesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, Tablo 7.1’de verilen karışımlar hazırlanmıştır. Her karışımın bir önceki karışımdan farklılığı koyu olarak yazılmıştır. Karışım I, yedinci bölümde SD simgesi ile ifade edilen karışımdır. İlk aşamada bu karışımın su miktarı azaltılarak, S/B oranı 0,40’tan 0,20 değerine indirgenmiştir (Karışım II). Karışım III’ün Karışım II’den tek farkı agrega olarak kuvars kullanılmasıdır. Karışım IV’ün Karışım III’ten farkı ise agrega/bağlayıcı oranınının 2,75’ten 2’ye düşürülmüş olmasıdır. Karışım V ise, Karışım IV’ten farklı olarak hacimce %3 oranında kısa kesilmiş çelik lif (OL6/0,16) içermektedir. Kullanılan lifin çapı 0,16 mm, uzunluğu ise 6 mm’dir.

Tablo 7.1 Dayanım üzerindeki etkin parametreleri belirlemeye yönelik olarak hazırlanan karışımlar

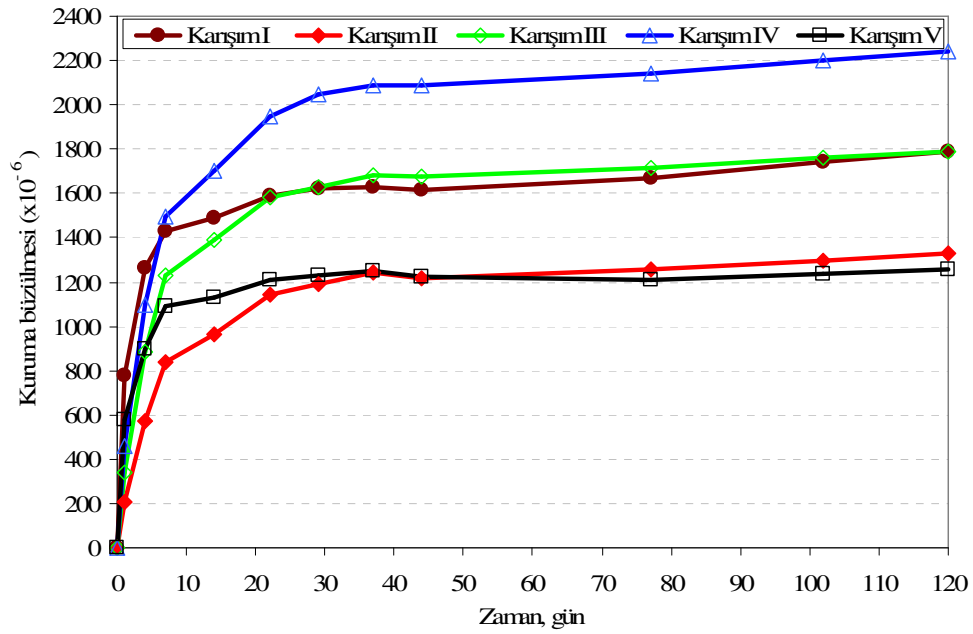
	<b>Karışım I</b>	<b>Karışım II</b>	<b>Karışım III</b>	<b>Karışım IV</b>	<b>Karışım V</b>
Agrega	Kireçtaşı	Kireçtaşı	<b>Kuvars</b>	Kuvars	Kuvars
Agrega/(YFC+SD)	2,75	2,75	2,75	<b>2</b>	2
SD	%20	%20	%20	%20	%20
Su/(YFC+SD)	0,40	<b>0,20</b>	0,20	0,20	0,20
Çelik lif (OL6/0,16)	--	--	--	--	<b>%3</b>
Yayıma, mm	159	106	104	141	111

Basınç dayanımının kür durumuna bağlı olarak değişimi Şekil 7.9’da verilmiştir. Buhar kürü durumunda, S/B oranının 0,4’ten 0,2’ye azaltılması ile dayanımda %130’u aşan bir artış ortaya çıkmıştır. Kireçtaşı agregası yerine kuvars kullanımı halinde dayanımda %20, agrega/bağlayıcı oranının 2,75’ten 2’ye düşürülmesi ile %6, çelik lif kullanımıyla ise %20 oranında dayanımda artış sağlanmıştır. Sonuç olarak, 177 MPa basınç dayanımına sahip bir karışım üretilmiştir.

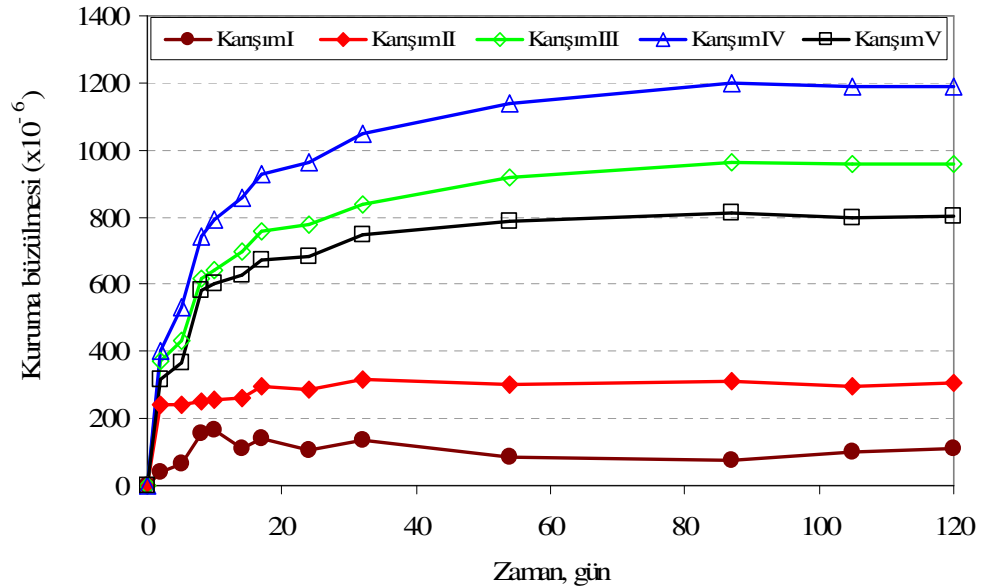


Şekil 7.9 Karışım özelliklerinin standart ve buhar kürü durumunda basınç dayanımına etkisi.

Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de sırasıyla standart ve buhar kürü durumları için kuruma büzülmesinin zamanla değişimi verilmiştir. Agregası olarak kireçtaşı yerine kuvars kullanımı ve agrega/bağlayıcı oranının azalması kuruma büzülmesini arttırırken, çelik lif kullanımı büzülmeyi azaltmıştır. Karışımın su içeriğindeki azalma, standart su kürü durumunda büzülmeyi azaltırken, buhar kürü durumunda arttırmıştır.



Şekil 7.10 Karşım özelliklerinin standart kür durumunda kuruma büzülmesine etkisi.



Şekil 7.11 Karşım özelliklerinin buhar kürü durumunda kuruma büzülmesine etkisi.

Elde edilen sonuçlar V numaralı karışımın RPC benzeri yapı malzemesi üretiminde kullanılabileceği yönündedir. Bu nedenle bundan sonraki aşamada bu karışım üzerinde bazı modifikasyonlar yapılarak araştırmalara devam edilecektir.

## 7.5 Yüksek Dayanımlı Kompozit Üretimi

Önceki bölümden elde edilen sonuçlar, YFC'nin alkalilerle aktive edilmesi yoluyla basınç dayanımı 200 MPa değerini aşan Reaktif Pudra Betonu (RPC) benzeri yapı malzemelerinin üretiminin mümkün olacağını kanıtlar niteliktedir. Silis dumanının alkali aktivasyon yöntemiyle üretilecek RPC betonlarının üretiminde de vazgeçilmez bir malzeme olduğu görülmüştür. Bu nedenle ilk olarak optimum silis dumanı oranının belirlenmesine yönelik deneyler yapılmıştır. Kıyaslama amacıyla CEM I 42.5R tipi PÇ kullanılarak benzer özellikli RPC örnekleri de hazırlanmıştır.

### 7.5.1 Optimum Silis Dumanı İçeriğinin Belirlenmesine Yönelik Deneyler

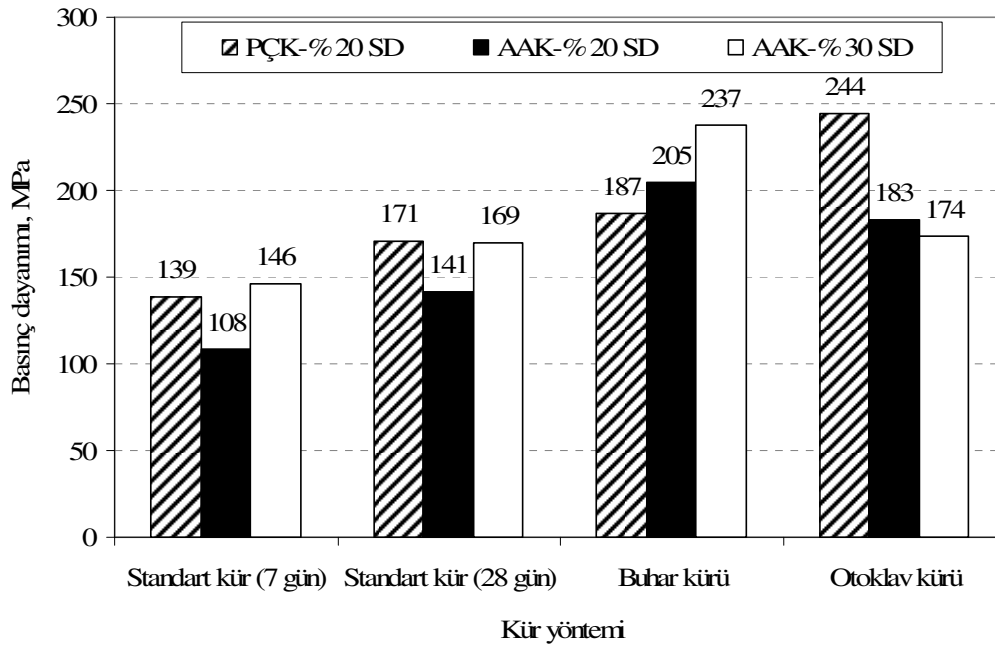
Optimum silis dumanı içeriğinin belirlenmesinde önceki bölümde verilen beş nolu karışım esas alınmıştır. Tablo 7.2'de karışım oranları verilen karışımlar bu karışımın agrega/bağlayıcı oranının bir miktar daha düşürülmesi ve YFC yerine %10, %20 ve %30 oranında SD ikamesi ile hazırlanmıştır. Bununla birlikte, %10 SD ikamesi ile üretilen AA karışımı üretiminden birkaç dakika sonra ani priz davranışı sergileyerek mikser içinde donmuştur. Bu nedenle, bu karışımdan numune alınamamış ve deney programından zorunlu olarak çıkarılmıştır. Ayrıca kıyaslama yapabilmek amacıyla, bağlayıcı dozajı alkalilerle aktive edilmiş karışımlarda olduğu gibi 900 kg/m<sup>3</sup>, su/bağlayıcı oranı 0,18 olan ve %20 oranında SD ikamesi yapılmış Portland çimentosu bağlayıcılı kontrol karışımı (PÇK-%20SD) hazırlanmıştır.

Tablo 7.2 Silis dumanı içeriğini belirlemeye yönelik deneylerde hazırlanan karışımlar

Malzeme, kg/m <sup>3</sup>	PÇK-%20SD	AAK-%20SD	AAK-%30SD
PÇ (CEM I 42.5R)	720,0	---	---
YFC	---	720,0	630,0
SD	180,0	180,0	270,0
Agrega	1210,8	1132,0	1106,4
Su	129,0	6,0	6,0
Cam suyu	--	240,0	240,0
NaOH	--	46,3	46,3
Çelik lif (OL 6/0,16)	235,5	235,5	235,5
SA (Glenium ACE 30)	55,0	--	--
Teorik B.H.A.	2530	2560	2534
Agrega/bağlayıcı	1,35	1,26	1,23
Yayılma, mm	140	140	142

40x40x160 mm boyutlu prizmatik eğilme örnekleri ve 25x25x285 mm boyutlu harç çubukları hazırlanarak; standart su kürü, buhar kürü ve otoklav kürüne maruz bırakılmıştır. Otoklav kürü 2 MPa basınç altında 8 saat süreyle uygulanırken, buhar kürü 100 °C sıcaklıkta 12 saat süreyle uygulanmıştır.

Şekil 7.12’de basınç dayanımının değişimi verilmiştir. Standart su küründe %30 SD içeren AAK karışımı ve PÇK karışımı benzer dayanımlara sahipken, %20 SD ikameli AAK karışımının basınç dayanımı bu karışımlardan daha düşük düzeydedir. 28. günde elde edilen en büyük dayanım 170 MPa civarındadır. Buhar ve otoklav kürü ile çok daha yüksek dayanımlar elde edilebilmiştir. En yüksek basınç dayanımı buhar küründe %30 SD içeren AAK karışımından, otoklav küründe ise bağlayıcısı Portland çimentosu olan PÇK karışımından elde edilmiştir. Buhar küründe her iki AAK karışımının basınç dayanımı da RPC için alt dayanım sınırı olan 200 MPa değerini aşmıştır. Otoklav kürü durumunda ise, AAK karışımlarının basınç dayanımı değeri 200 MPa limitinin altında kalmıştır. Bir başka deyişle, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen AAK karışımları için buhar kürü, Portland çimentosu bağlayıcılı PÇK karışımı için ise otoklav kürü daha uygundur.

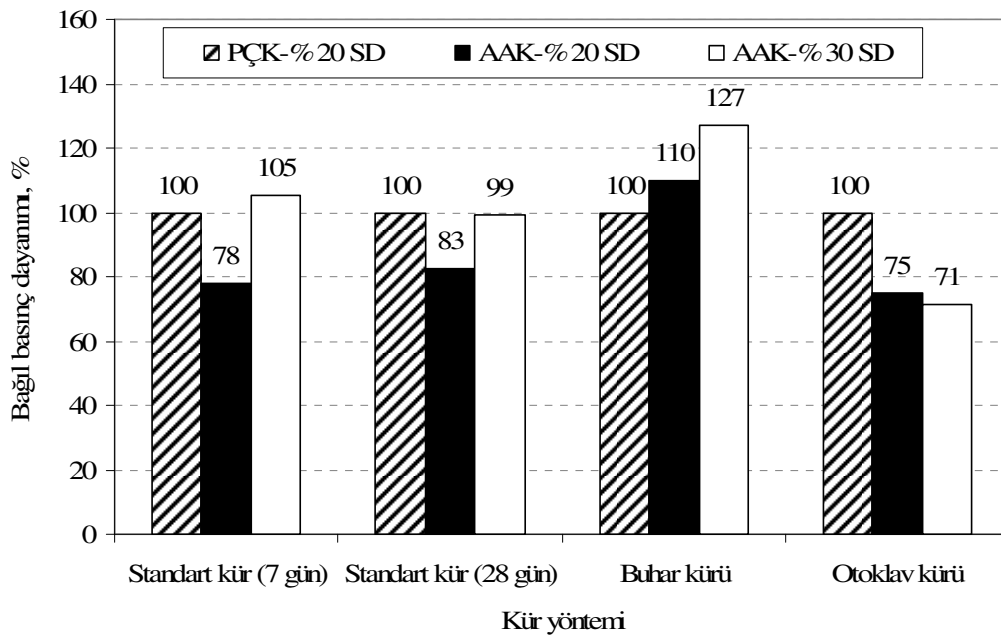


Şekil 7.12 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin basınç dayanımına etkisi.



Şekil 7.13'te bağlayıcısı çimento olan kontrol karışımına kıyasla AAK kompozitlerinin bağıl basınç dayanımı verilmiştir. Otoklav kürü AAK karışımlarının basınç dayanımını olumsuz etkilerken, buhar kürü PÇK karışımına kıyasla daha üstün performans elde edilmesine olanak sağlamıştır. Standart su kürü durumunda ise, AAK-%20 SD karışımı PÇK karışımından daha düşük dayanım sunarken, AAK-%30 SD PÇK ile benzer davranış sergilemiştir.

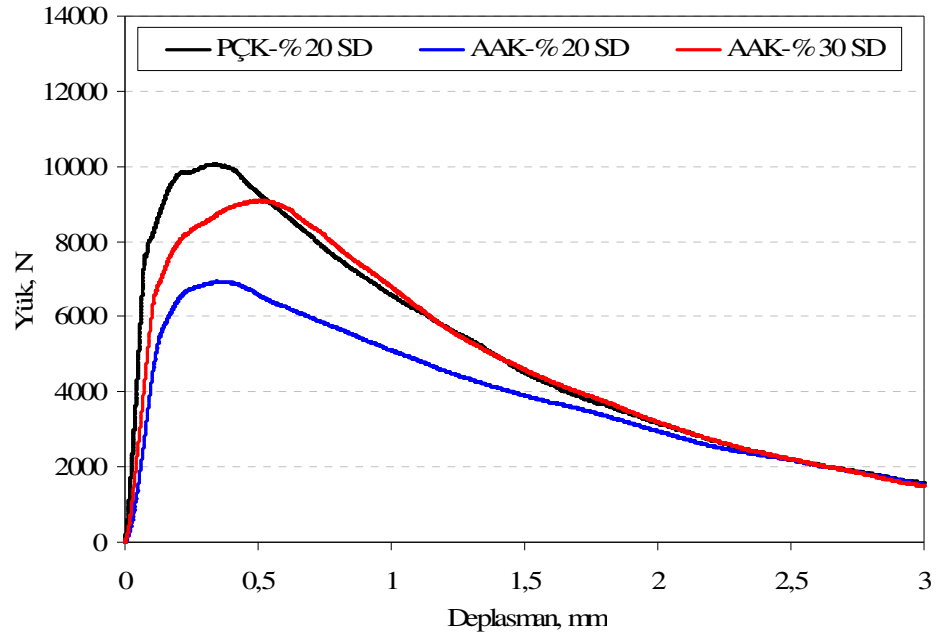
Genel olarak değerlendirildiğinde, AAK karışımları için en uygun kür yönteminin buhar kürü olduğu söylenebilir. PÇK karışımında en yüksek dayanım otoklav kürü durumunda elde edilmiş olup 244 MPa'dır. AAK karışımlarında ise en yüksek dayanım 237 MPa olup, buhar kürü durumunda AAK-%30 SD karışımından elde edilmiştir.



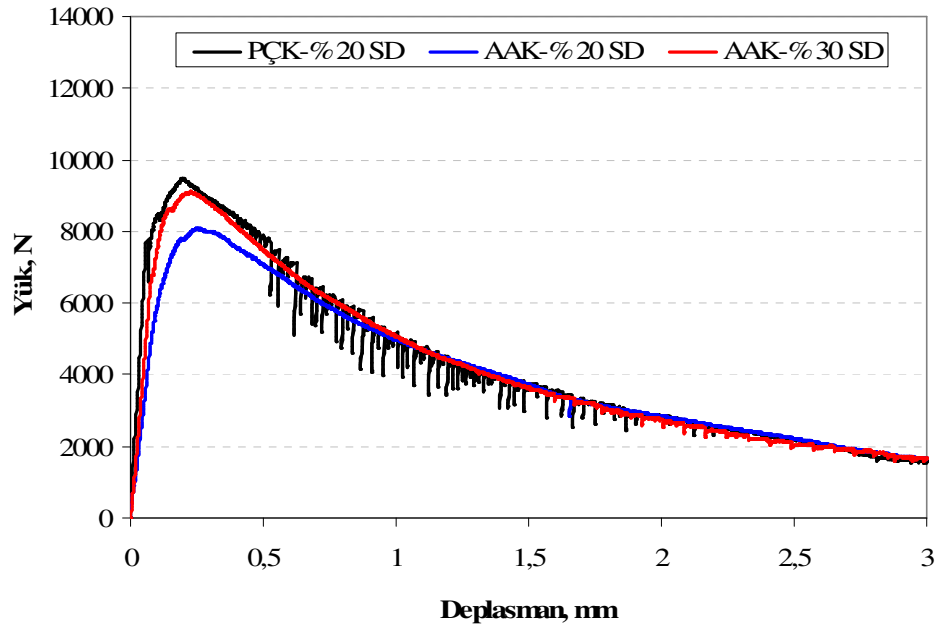
Şekil 7.13 Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş lifli kompozitlerin PÇK karışımına kıyasla bağıl basınç dayanımları.

Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'te sırasıyla 7 ve 28 gün standart su kürüne maruz bırakılmış karışımlarının, Bölüm 5.2.8'de açıklanan yöntemle belirlenen, yük-deplasman eğrileri verilmiştir. 7. günde yük-deplasman eğrileri üç karışım için de benzer özellik göstermiştir. PÇK karışımının ulaştığı maksimum yük seviyesi AAK

karişimlarına kıyasla bir miktar daha yüksektir. SD oranının %20'den %30'a çıkması ile AAK kompozitlerinin maksimum yük seviyesi artmıştır. 28 gün su küri durumunda maksimum yük seviyeleri arasındaki fark azalmış ve PÇK karişımının yük-deplasman eğrisinde, artan lif-matris aderansının bir sonucu olarak, ani yük düşüşleri görülmüştür.

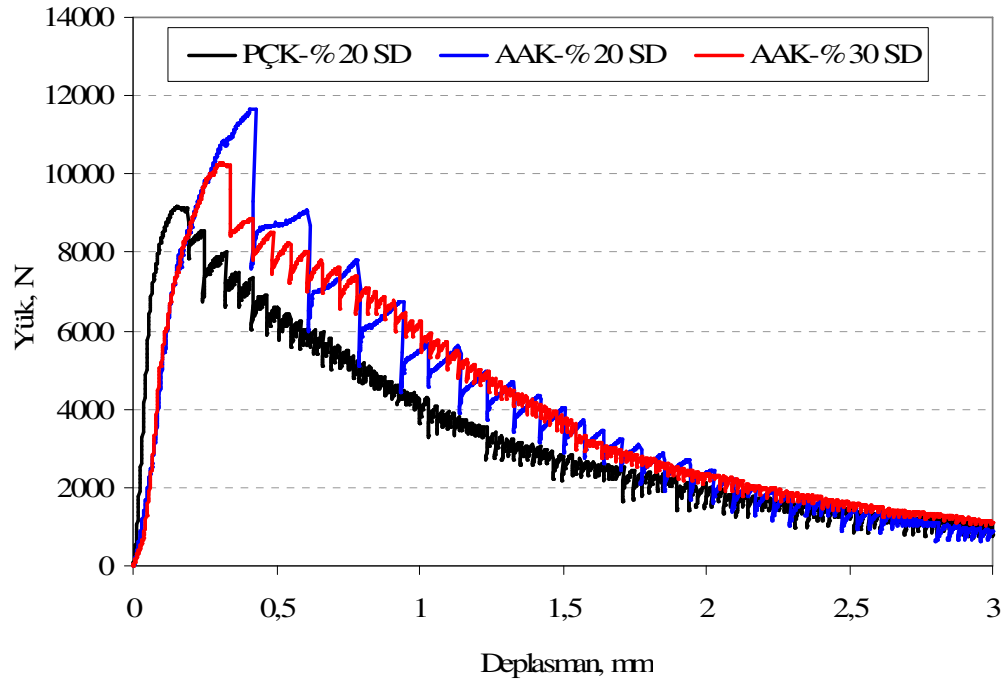


Şekil 7.14 7 gün standart su küriine maruz bırakılmış lifli kompozitlerin SD oranına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

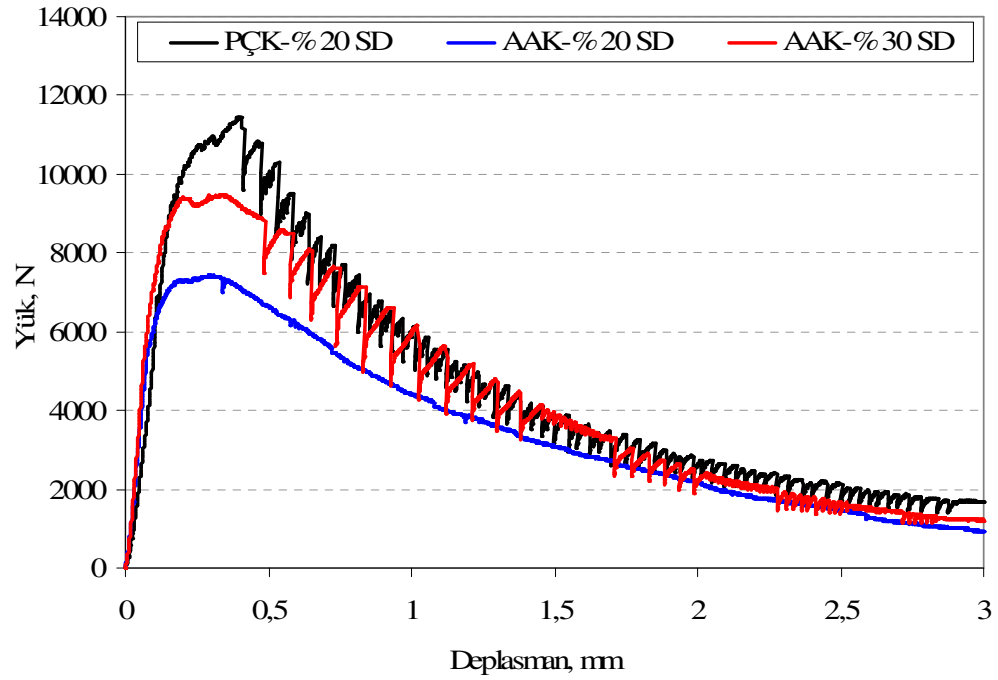


Şekil 7.15 28 gün standart su kürüne maruz bırakılmış lifli kompozitlerin SD oranına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

Şekil 7.16 ve Şekil 7.17’de sırasıyla buhar ve otoklav kürü geçirmiş kompozitlerin yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Yük-deplasman eğrilerinin benzer karakteristikler sergilediği görülmektedir. Bununla birlikte, buhar küründe AAK karışımının, otoklav küründe ise PÇK karışımının ulaştığı maksimum yük seviyesi daha yüksektir. Buhar ve otoklav kürü geçirmiş lifli kompozitlerin yük-deplasman eğrilerinin alçalan kısmında görülen yükteki ani azalışlar; lif boyu (6 mm), lif yönlenmesi, liflerin aşamalı sıyrılması ve matris-lif aderansı ile ilgili olabilir. Bununla birlikte ani yük düşmeleri 7 gün su kürü geçirmiş harçlarda gözlenmemiştir. Bu davranış, erken yaşta lif ile matris arasındaki aderansın daha düşük olması ile ilgilidir.

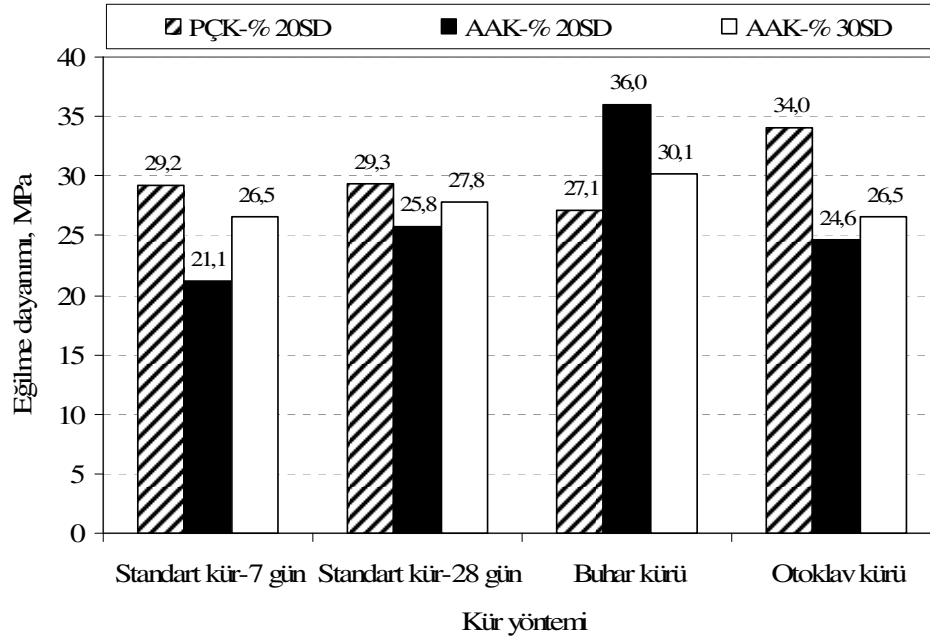


Şekil 7.16 Buhar kürü geçirmiş lifli kompozitlerin SD oranına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

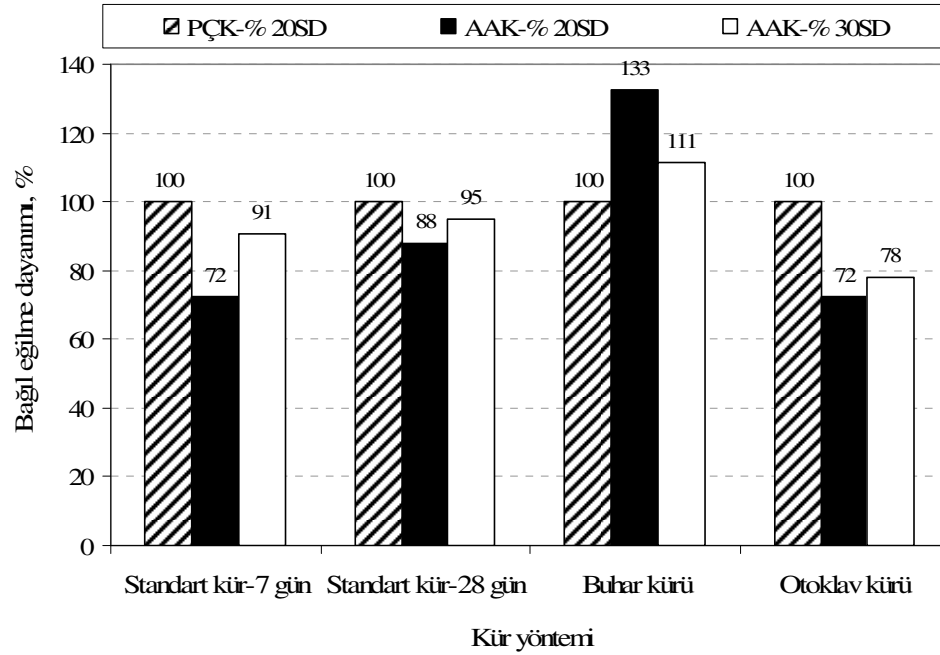


Şekil 7.17 Otoklav kürü geçirmiş lifli kompozitlerin SD oranına bağlı yük-deplasman eğrileri.

Şekil 7.18 ve Şekil 7.19’da kompozitlerin eğilme dayanımının ve bağlı eğilme dayanımının değişimi verilmiştir. Buhar kürü durumunda en yüksek eğilme dayanımı %20 oranında SD içeren AAK karışımından elde edilirken, otoklav kürü durumunda, basınç dayanımında olduğu gibi, bağlayıcısı çimento olan PÇK karışımından elde edilmiştir. Otoklav kürü AAK karışımlarının eğilme dayanımını olumsuz etkilerken, buhar kürü durumunda AAK karışımları PÇK karışımının üzerinde bir performans sergilemiştir. AAK karışımları 28 gün standart su kürü ile otoklav kürüne göre daha yüksek, buhar kürüne göre ise daha düşük dayanımlar vermiştir. PÇK karışımı için ise durum tam tersidir.

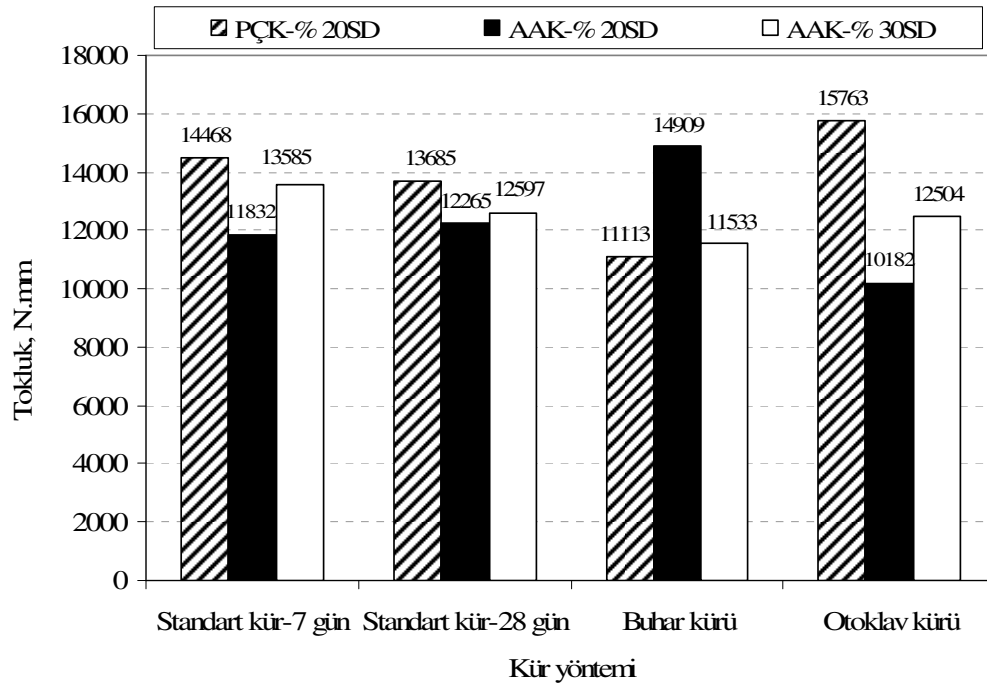


Şekil 7.18 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin eğilme dayanımına etkisi.

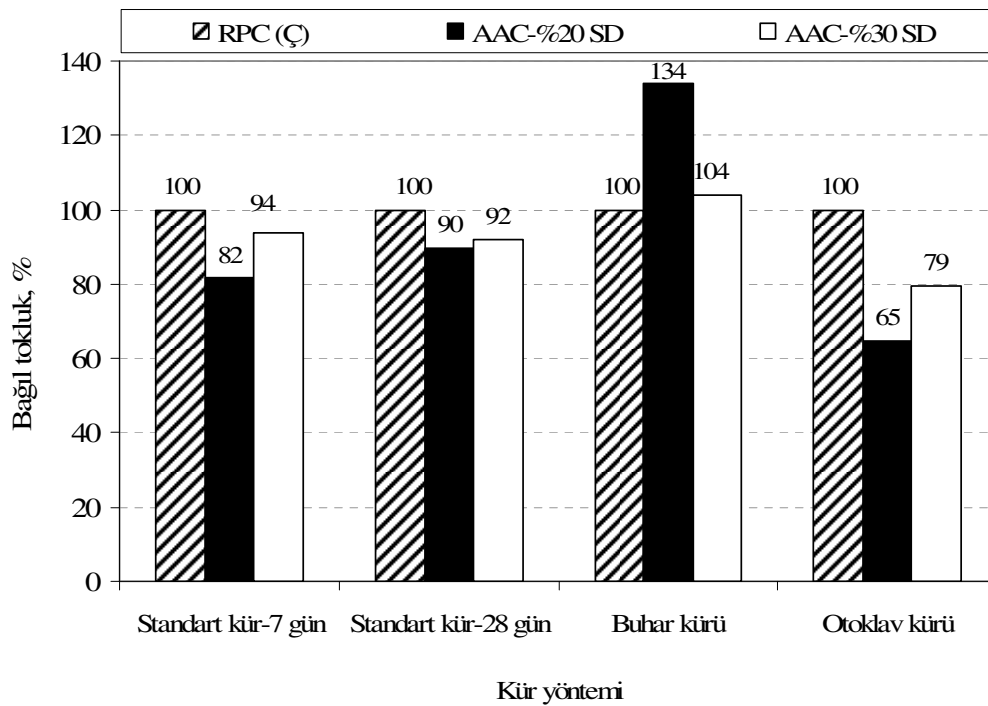


Şekil 7.19 Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş lifli kompozitlerin PÇK karışımına kıyasla bağlı eğilme dayanımları.

Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de tokluk ve bağlı tokluk değerlerinin değişimi verilmiştir. Tokluk hesabı 3 mm deplasman değerine kadar yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilmiştir. Tokluk değerlerinin değişiminin eğilme dayanımı ile aynı eğilimde olduğu görülmektedir. Buhar küründe en yüksek basınç dayanımı AAK-%30SD karışımından elde edilmesine rağmen, tokluk ve eğilme dayanımı performansı bakımından en yüksek performans AAK-%20SD karışımından elde edilmiştir.

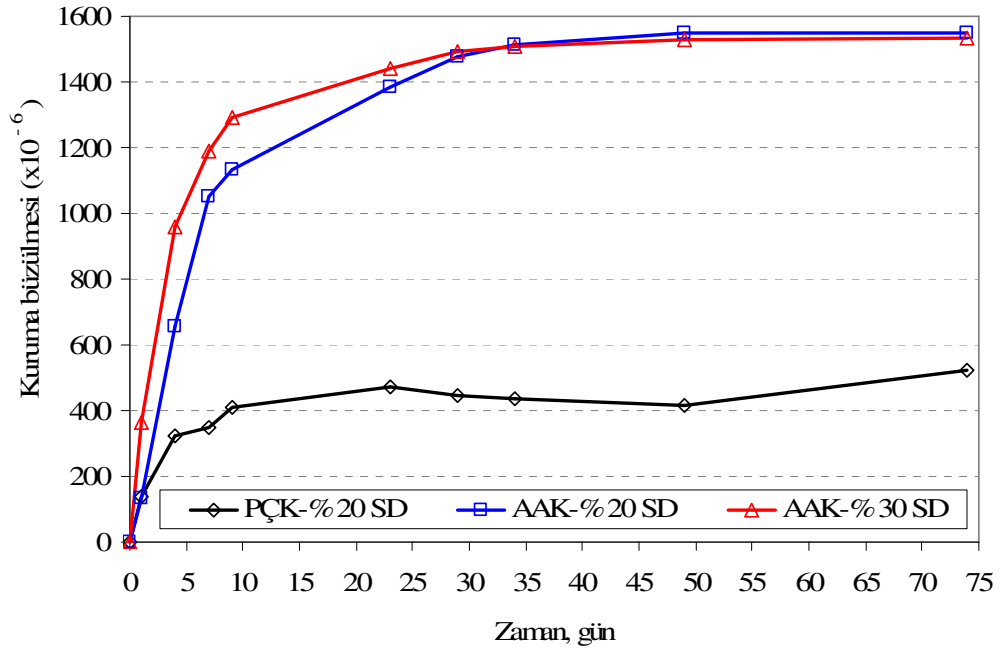


Şekil 7.20 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin tokluk değeri üzerindeki etkisi.



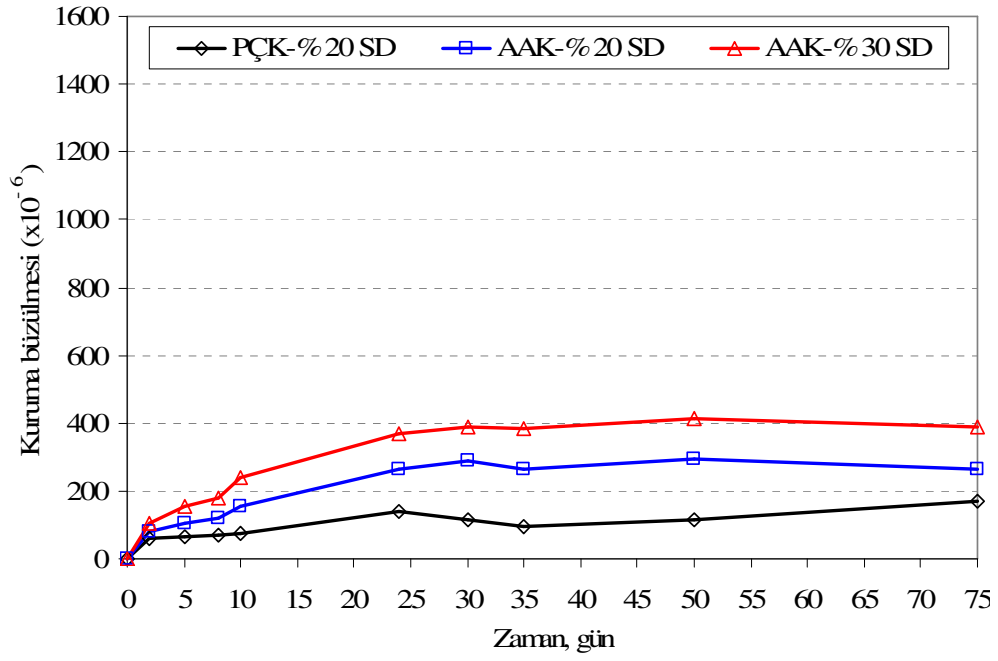
Şekil 7.21 Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş lifli kompozitlerin PÇK karışımına kıyasla bağıl tokluk değerleri.

Karışımlarının standart kür, buhar kürü ve otoklav kürü durumunda kuruma büzülmesinin değişimi sırasıyla, Şekil 7.22, 7.23 ve 7.24'te verilmiştir. Standart kür durumunda, AAK kompozitlerinin kuruma büzülmesi PÇK kompozitlerine kıyasla yaklaşık 3 kat daha fazla olup, 1550 mikrostrain seviyelerindedir. Buhar ve otoklav kürü kuruma büzülmesini önemli derecede azaltmıştır. AAK karışımlarının kuruma büzülmesi, PÇK karışımlarından yine de fazladır. Ancak, ısı işlem geçirmiş AAK karışımlarının kuruma büzülmesi, Bölüm 6.4'teki yaklaşımla kabul edilebilir seviyelerin önemli derecede altındadır.

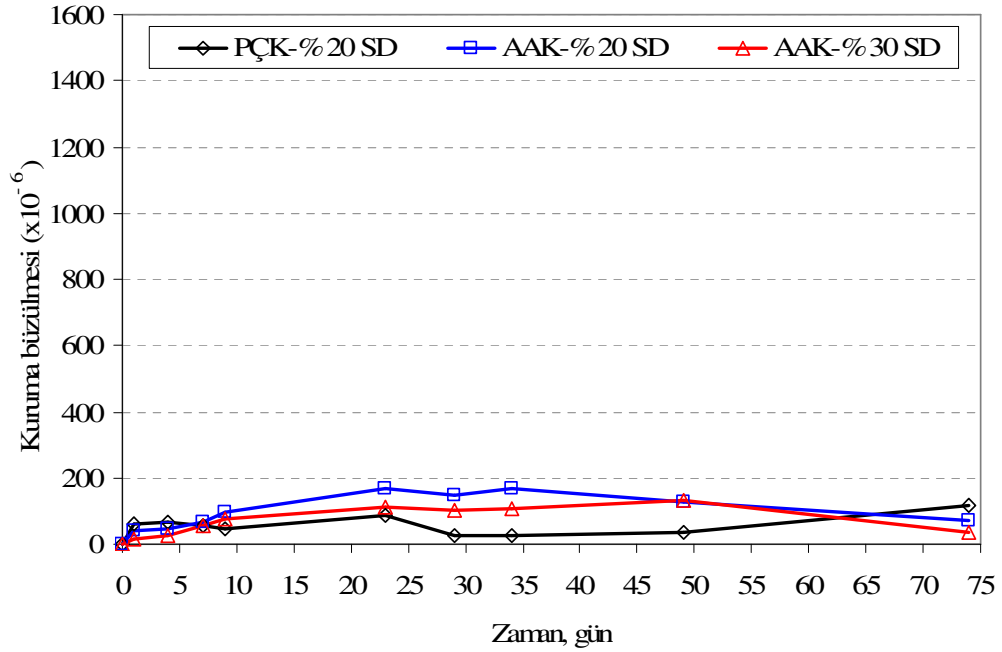


Şekil 7.22 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi (standart kür).





Şekil 7.23 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi (buhar kürü).



Şekil 7.24 SD içeriğinin alkalilerle aktive edilmiş lifli kompozitlerin kuruma büzülmesi üzerindeki etkisi (otoklav kürü).

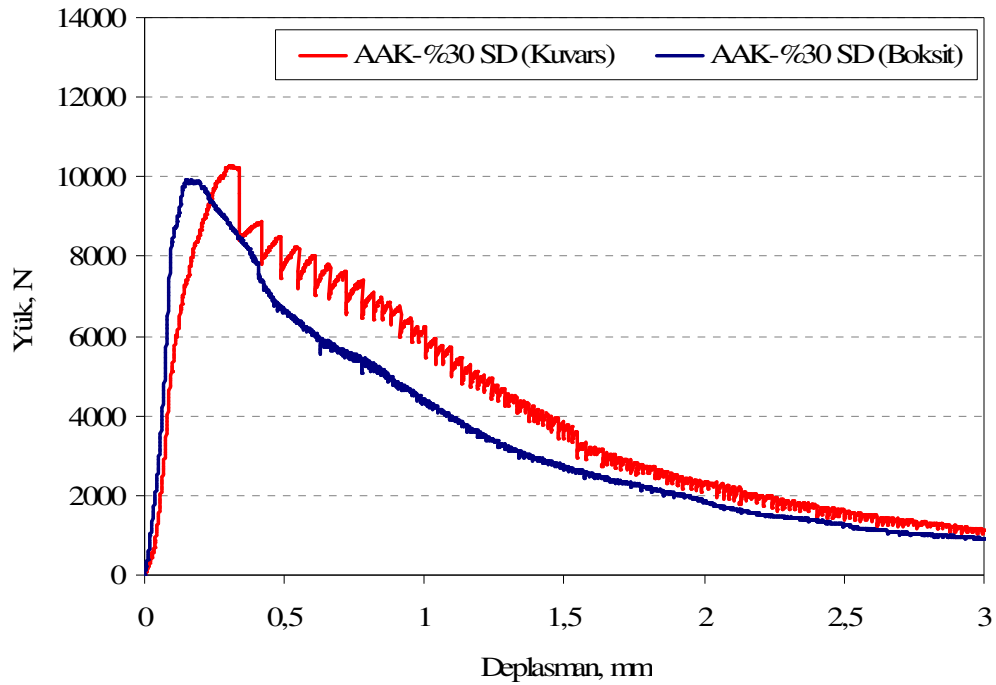
Elde edilen veriler ışığında bundan sonraki aşamada,

- potansiyel olarak elde edilebilecek en fazla basınç dayanımı değerini ve
- ekonomik açıdan daha uygun bir karışım tasarımını (RPC için minimum basınç dayanımı değeri sınırı olan 200 MPa değerinin üzerinde dayanıma sahip) belirlemeye yönelik bir deneysel program gerçekleştirilmiştir.

### ***7.5.2 Potansiyel Olarak Elde Edilebilecek En Yüksek Basınç Dayanımının Araştırılması***

Önceki bölümde alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen kompozitler için en uygun kür yönteminin buhar kürü olduğu görülmüştür. En iyi basınç dayanımı performansı ise YFC yerine %30 oranında silis dumanı ikame edilerek elde edilmiştir. Bu bağlayıcıdan potansiyel olarak elde edilebilecek maksimum basınç dayanımını belirleyebilmek için kuvars yerine sinterlenmiş boksit agregası kullanılmıştır. Bilindiği gibi, sinterlenmiş boksit basınç dayanımı en yüksek agregalardandır. Özgül ağırlık farkından dolayı (boksitin özgül ağırlığı 3,24), bu karışımda kullanılan boksit miktarı  $1352,8 \text{ kg/m}^3$  olmuştur. Diğer bileşenlerin miktarı AAK-%30SD karışımı ile aynıdır. Karışımın yayılma değeri 109 mm olarak bulunmuştur.

Karşılaştırma amacıyla sinterlenmiş boksit agregalı karışımla birlikte kuvars agregalı karışımın yük-deplasman eğrisi de Şekil 7.25'te verilmiştir. Tokluk, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı ise Tablo 7.3'te verilmiştir. Tokluk ve eğilme dayanımı bakımından kuvars agregalı karışım bir miktar daha iyi performans sergilerken, basınç dayanımı bakımından boksit agregalı karışım nispeten daha yüksek basınç dayanımı (258 MPa) vermiştir.



Şekil 7.25 Kuvars ve boksit agregalı lifli kompozitlerin yük-deplasman eğrileri (buhar kürü).

Tablo 7.3 Kuvars ve boksit agregalı lifli kompozitlerin mekanik özellikleri (buhar kürü)

	AAK-%30SD (Kuvars)	AAK-%30SD (Boksit)
Basınç dayanımı, MPa	237,5	257,9
Eğilme dayanımı, MPa	30,1	28,9
Tokluk, N.mm	12389	11835

Bu bölümde, yapılan araştırmalar sonucunda üzerinde çalışılan karışımdan potansiyel olarak elde edilebilecek en büyük basınç dayanımı (258 MPa) belirlenmiştir. Basınç dayanımında önemli bir artış kaydedilmemesine (~ %9) ilaveten, diğer özelliklerdeki azalma, ilerleyen aşamalarda temin edilmesindeki zorluklar ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle boksit agregası kullanılmasından vazgeçilmiştir.

### 7.5.3 Daha Ekonomik RPC Benzeri Kompozit Malzeme Üretimine Yönelik Deneyler

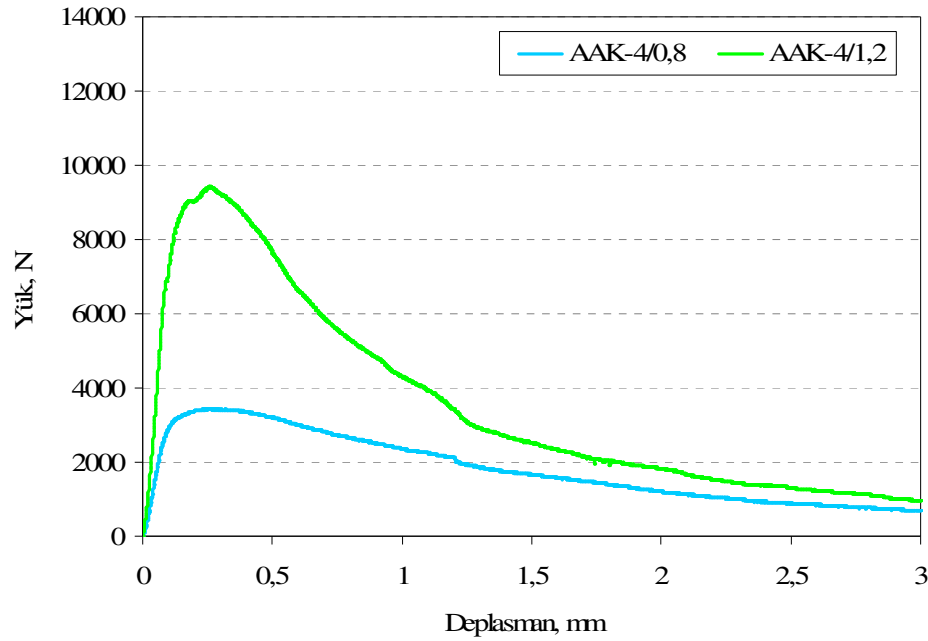
Buraya kadar yapılan deneyler, silis dumanının Portland çimentosu bağlayıcılı sistemlerden farklı olarak, AA harçlarının priz süresini uzattığı ve karışımın

işlenebilirliğini arttırdığını göstermiştir. YFC yerine %10 oranında silis dumanı ikamesi halinde silis dumanın bu olumlu etkileri elde edilememiştir. Karışım mikser içinde aniden donmuştur. Silis dumanı, YFC ve hatta Portland çimentosuna kıyasla daha pahalı bir bileşendir. Bu nedenle, %30 oranında kullanımı ekonomik açıdan pek uygun değildir. Ayrıca, bu ikame oranında eğilme dayanımı ve tokluk %20 SD ikamesine kıyasla daha düşük seviyededir. Bu sebeplerden ötürü, ekonomik bir karışım üretimine yönelik deneylerde YFC yerine %20 oranında silis dumanı ikamesine karar verilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı dozajı ve aktivatör dozajı bir miktar azaltılmıştır. Hazırlanan karışımlar Tablo 7.4'te verilmiştir. Karışımların bağlayıcı dozajı  $800 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Birinci karışımın  $M_s$  değeri 0,8, su/bağlayıcı oranı ise diğer karışımlardan farklı olarak 0,27'dir. Su/bağlayıcı oranının diğer karışımlara nazaran daha yüksek olmasının nedeni, 0,18 su/bağlayıcı oranında karışımın nemli toprak kıvamında olmasıdır.

Tablo 7.4 Çözelti modülünün etkisinin belirlenmesine yönelik deneylerde hazırlanan karışımlar

Malzeme, $\text{kg/m}^3$	AAK-4/0,8	AAK-4/1,2
YFC	640,0	640,0
SD	160,0	160,0
Agrega	1121,8	1308,0
Su	156,4	51,6
Cam suyu	94,8	142,2
NaOH	32,5	27,4
Çelik lif (OL 6/0,16)	235,5	235,5
Teorik B.H.A.	2441	2565
Su/bağlayıcı	0,27	0,18
Agrega/bağlayıcı	1,40	1,64
Yayılma, mm	102	103

Şekil 7.26'da karışımların yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Maksimum yük seviyelerinin oldukça farklı olduğu görülmektedir.



Şekil 7.26 Çözelti modülüne bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

Karışımların mekanik özellikleri Tablo 7.5'te verilmiştir.  $M_s$  değerindeki azalma nedeniyle su ihtiyacında oluşan artışın dayanımları önemli ölçüde düşürdüğü görülmüştür. Bu durum yüksek dayanımlı kompozit üretimi için  $M_s$  değerinin 0,8'den daha yüksek olması zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte,  $800 \text{ kg/m}^3$  bağlayıcı dozajında %4  $\text{Na}_2\text{O}$  ve 1,2  $M_s$  oranında, 177,8 MPa gibi oldukça yüksek dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Buradan hareketle çözelti özelliklerini değiştirmeden bağlayıcı dozajını  $900 \text{ kg/m}^3$ 'e çıkararak denemeler yapılmış ve bu yolla basınç dayanımı 200 MPa'nın üzerinde olan kompozitlerin üretilebileceği görülmüştür. Bu karışım üzerinde yapılan deneyler lif boyunun ve dozajının mekanik özelliklere etkisi bölümünde verilmiştir.

Tablo 7.5 Çözelti modülünün mekanik özelliklere etkisi

	AAK 4/0,8	AAK 4/1,2
Basınç dayanımı, MPa	52,2	177,8
Eğilme dayanımı, MPa	10,4	30,3
Tokluk, N.mm	5113	11919

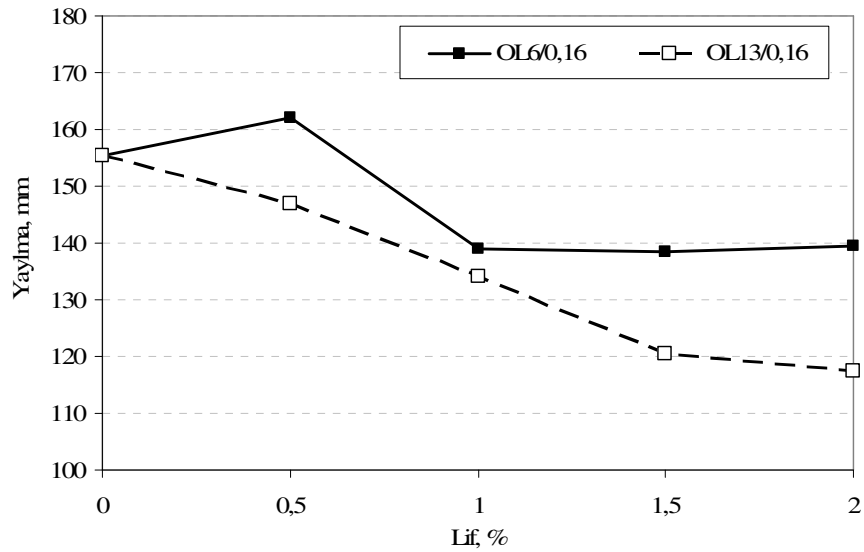
## 7.6 Lif Boyu ve Dozajının Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, kompozit üretiminde kullanılacak lifin dozajı ve uzunluğu belirlenmiştir. Özellikleri Bölüm 5.1.7’de verilen iki tip yüksek dayanımlı çelik lif, OL6/0,16 (6 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapında) ve OL13/0,16 (13 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapında) kullanılmıştır. Lifler hacimce %0,5, %1, %1,5 ve %2 oranlarında kullanılmıştır. Lif boyunun ve dozajının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk üzerindeki etkisi 40x40x160 mm boyutundaki numuneler üzerinde belirlenmiştir. Hazırlanan karışımların bağlayıcı dozajı 900 kg/m<sup>3</sup> olup, karışım reçetesi Tablo 7.6’da verilmiştir.

Tablo 7.6 Lif dozajının mekanik özelliklere etkisini belirlemeye yönelik olarak hazırlanan karışımlar

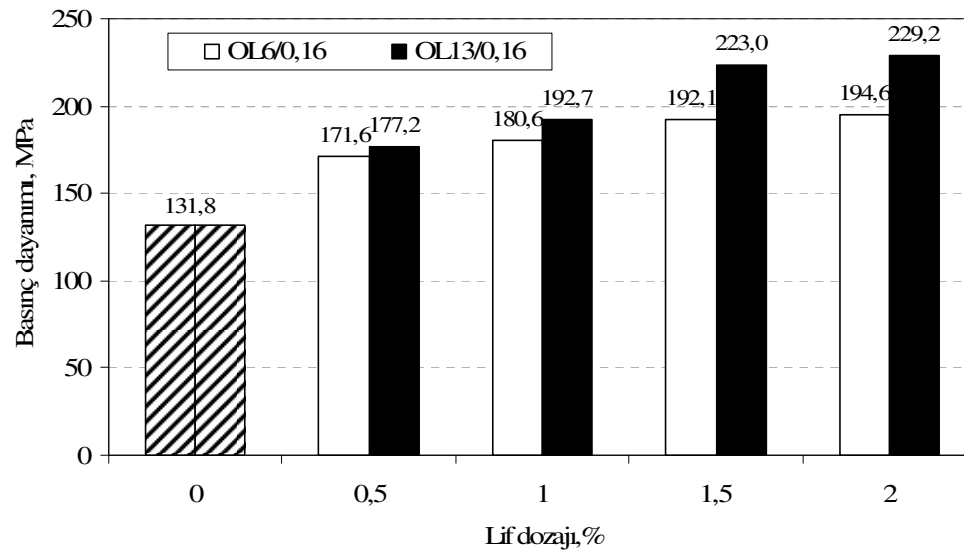
Malzeme, kg/m <sup>3</sup>	Lif, %				
	0	0,5	1	1,5	2
YFC	720,0	720,0	720,0	720,0	720,0
SD	180,0	180,0	180,0	180,0	180,0
Kuvars (1-3 mm)	561,1	555,1	549,2	543,2	537,2
Kuvars (0,6-1,2 mm)	436,4	431,8	427,1	422,5	417,8
Kuvars (0-400 µm)	149,6	148,0	146,4	144,9	143,3
Kuvars (0-75 µm)	99,7	98,7	97,6	96,6	95,5
Cam suyu	160,0	160,0	160,0	160,0	160,0
NaOH	30,9	30,9	30,9	30,9	30,9
Su	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0
Lif	0	39,3	78,5	117,8	157

Lif dozajına ve boyuna bağlı olarak yayılma çapının değişimi Şekil 7.27’de verilmiştir. 13 mm uzunluğunda lif kullanımı beklendiği gibi 6 mm uzunluğundaki liflere kıyasla yayılma çapında daha fazla azalmaya yol açmaktadır. Uzunluğu 6 mm olan liflerin %1 ve üzerinde kullanımı ile yayılma çapında değişme oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 13 mm uzunluğundaki lifler yayılma çapında sürekli olarak azalmaya yol açmış ve %2 oranında lif kullanımında yayılma çapı 120 mm değerinin altına düşmüştür.



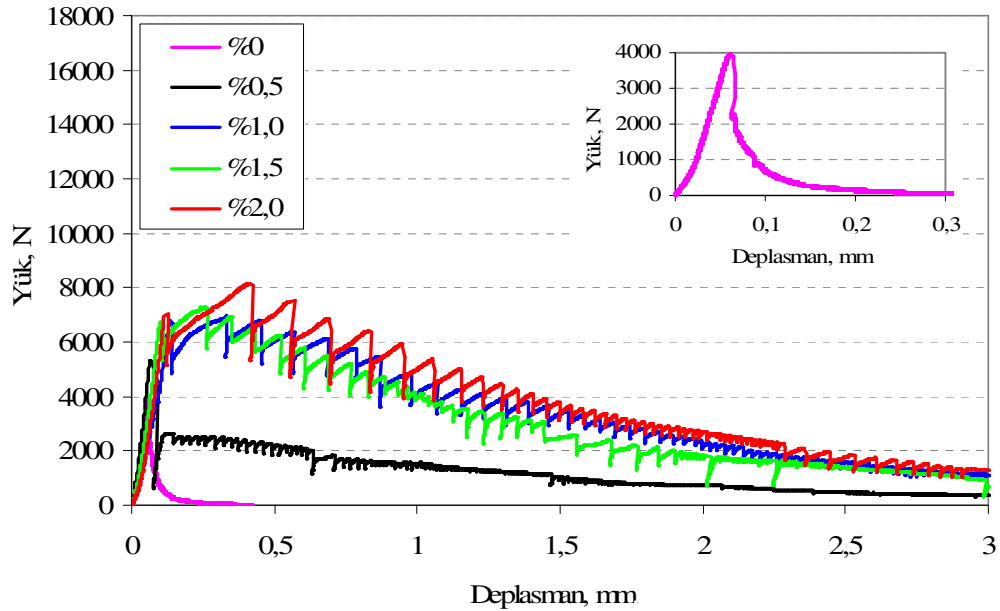
Şekil 7.27 İşlenebilirliğin lif dozajına ve boyuna bağlı olarak değişimi.

Basınç dayanımının lif dozajına ve boyuna bağlı olarak değişimi Şekil 7.28’de verilmiştir. RPC için alt sınır değer kabul edilen 200 MPa basınç dayanımına 6 mm uzunluğunda lif kullanımında %2 lif dozajında bile erişilemezken, 13 mm uzunluğunda lif kullanımında bu sınır %1,5 ve %2 lif dozajlarında aşılmıştır. Aynı lif dozajında 13 mm uzunluğunda lif kullanımı halinde basınç dayanımı 6 mm uzunluğunda lif kullanımına göre %3-18 arasında artmıştır.



Şekil 7.28 Basınç dayanımının lif dozajına ve boyuna bağlı olarak değişimi.

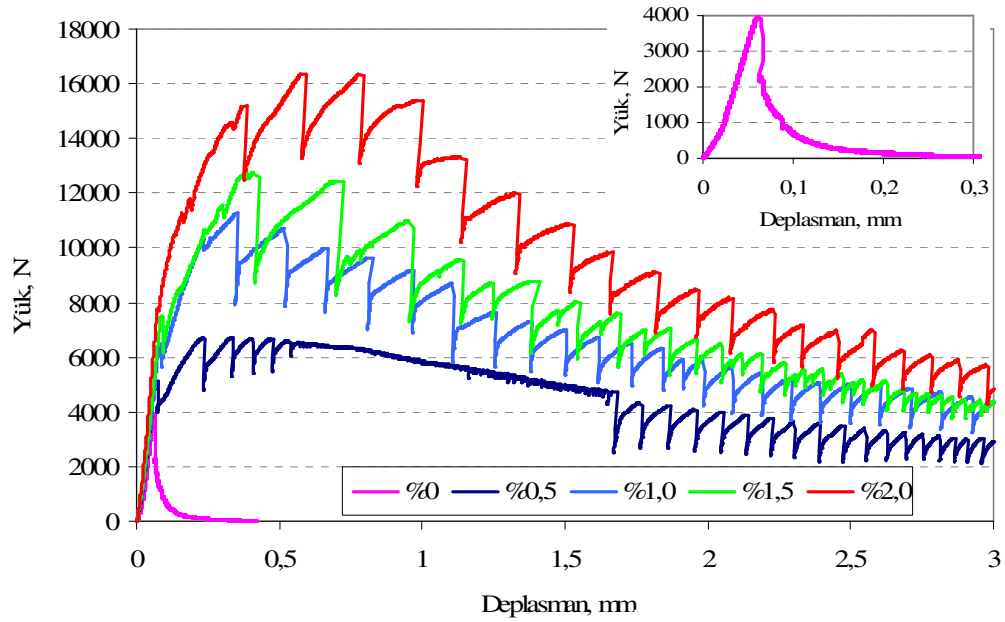
6 mm uzunluğunda lif kullanımı durumunda, lif dozajına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri Şekil 7.29'da verilmiştir. Sağ üst köşede verilen eğri lifsiz durumdaki yük-deplasman eğrisidir. Maksimum yük seviyesinin ve özellikle ulaşılan deplasman seviyesinin lifli örneklere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Yüzde 0,5 lif dozajında diğer oranlara kıyasla ulaşılan yük seviyesinin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Yüzde 1 ve %1,5 lif dozajında davranış birbirine oldukça yakınken, %2 lif oranında bir miktar daha iyi performans elde edilmiştir.



Şekil 7.29 Lif dozajına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri (OL6/0,16).

Şekil 7.30'da, 13 mm uzunluğunda lif kullanımı durumunda, lif dozajına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Sağ üst köşede verilen eğri lifsiz durumdaki yük-deplasman eğrisidir. Daha önce de belirtildiği gibi, maksimum yük seviyesinin ve özellikle ulaşılan deplasman seviyesinin lifli örneklere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Kısa kesilmiş 6 mm uzunluğundaki liflerle kıyaslandığında, performans farklılığı açıkça görülebilmektedir. %1 ve %1,5 lif dozajında davranışın oldukça benzer olduğu görülmüştür. Lif dozajının ve uzunluğunun artışı ile maksimum yüke karşılık gelen deplasman miktarı da artmıştır.

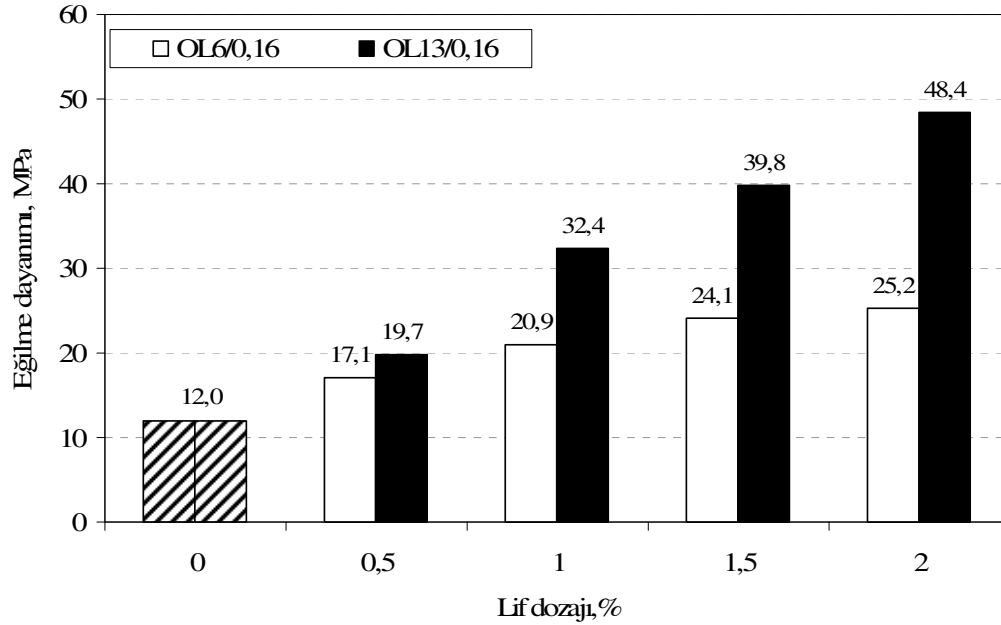




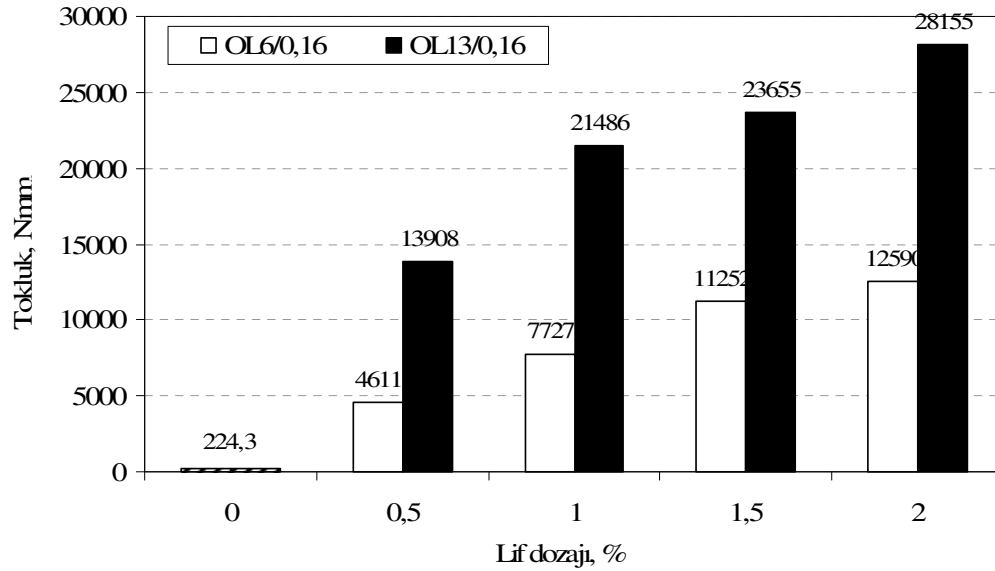
Şekil 7.30 Lif dozajına bağlı olarak yük-deplasman eğrileri (OL13/0,16).

Lif dozajına ve uzunluğuna bağlı olarak eğilme dayanımının değişimi Şekil 7.31'de verilmiştir. Lif boyunun eğilme dayanımına etkisinin basınç dayanımına kıyasla çok daha çarpıcı olduğu görülmektedir. Bu etki, %1 ve üzerindeki lif dozajlarında daha fazla belirginleşmiştir. Eğilme dayanımı 13 mm uzunluğunda lif kullanımında 6 mm uzunluğunda lif kullanımına göre, %0,5 lif dozajında yaklaşık %15 oranında artarken, %2 lif dozajında %92 oranında artmıştır.

Şekil 7.32'de lif dozajına ve uzunluğuna bağlı olarak tokluğun değişimi verilmiştir. Lif kullanımı ile toklukta oluşan artışın eğilme ve basınç dayanımına kıyasla çok daha fazla olduğu görülmektedir. Uzunluğu 13 mm olan lif kullanımıyla tokluk 6 mm uzunluğunda lif kullanımına göre %110-202 oranında artmıştır.



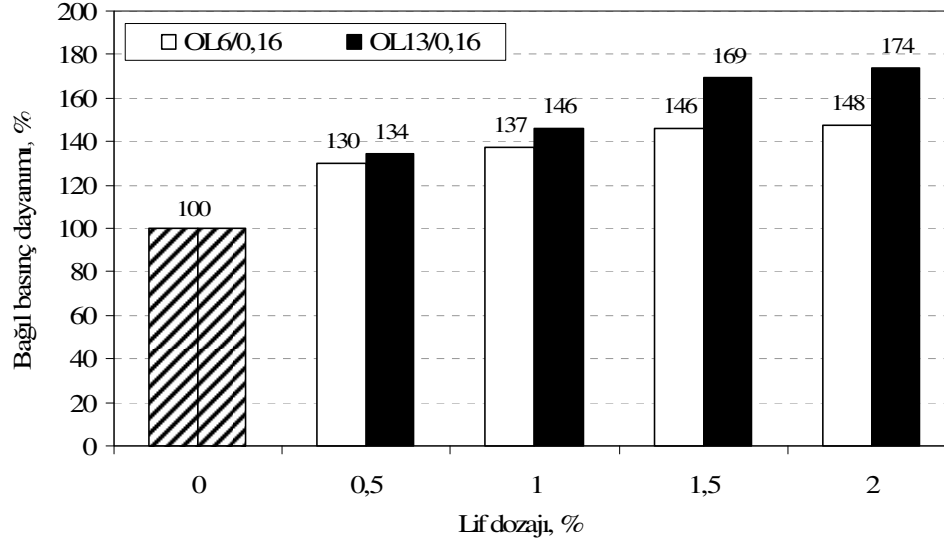
Şekil 7.31 Eğilme dayanımının lif dozajına bağlı olarak değişimi.



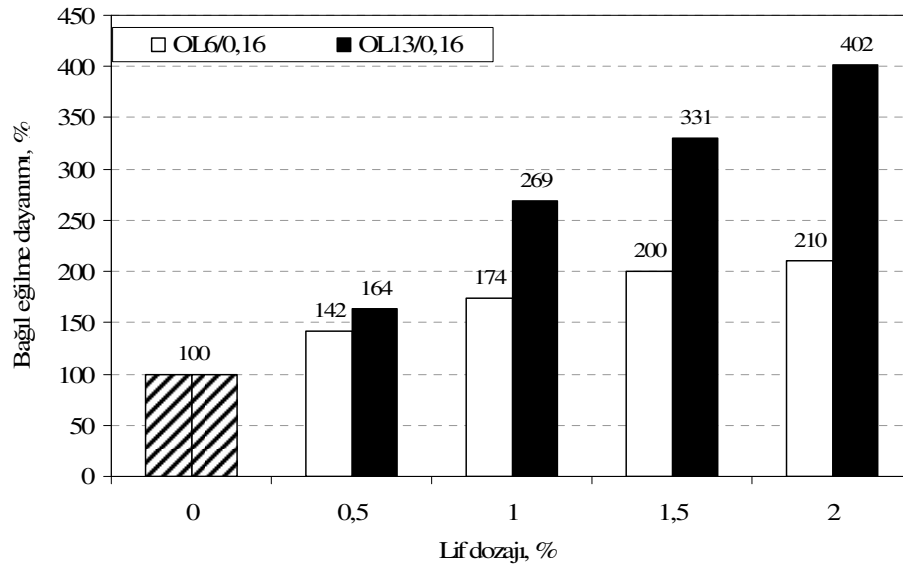
Şekil 7.32 Tokluk değerinin lif dozajına bağlı olarak değişimi.

Lifsiz harca kıyasla bağıl basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluğun değişimi sırasıyla Şekil 7.33, Şekil 7.34 ve Şekil 7.35'te verilmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere, beklendiği gibi lif kullanımı ile en fazla artan mekanik özellik tokluktur. Tokluğu eğilme ve basınç dayanımı takip etmektedir. Basınç dayanımı kısa lif kullanımında %30-48 arasında, uzun lif kullanımında ise %34-74 arasında artmıştır.

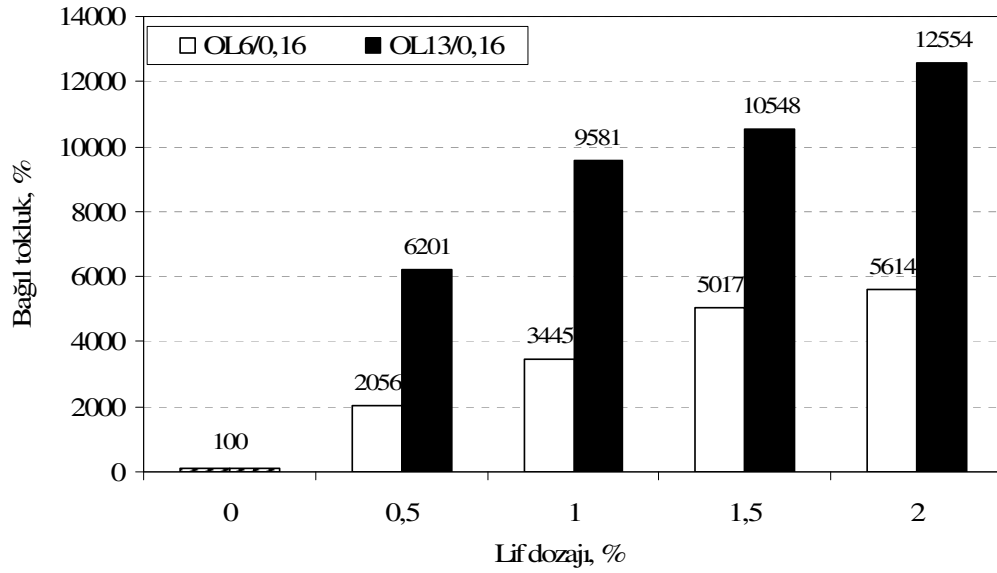
Eğilme dayanımındaki artış sırasıyla %42-110, %64-302 oranında olmuştur. Tokluktaki artış ise, %2000-5500 ve %6100-12500 dolaylarında olmuştur.



Şekil 7.33 Lifsiz harca kıyasla bağıl basınç dayanımının lif dozajına bağlı olarak değişimi.

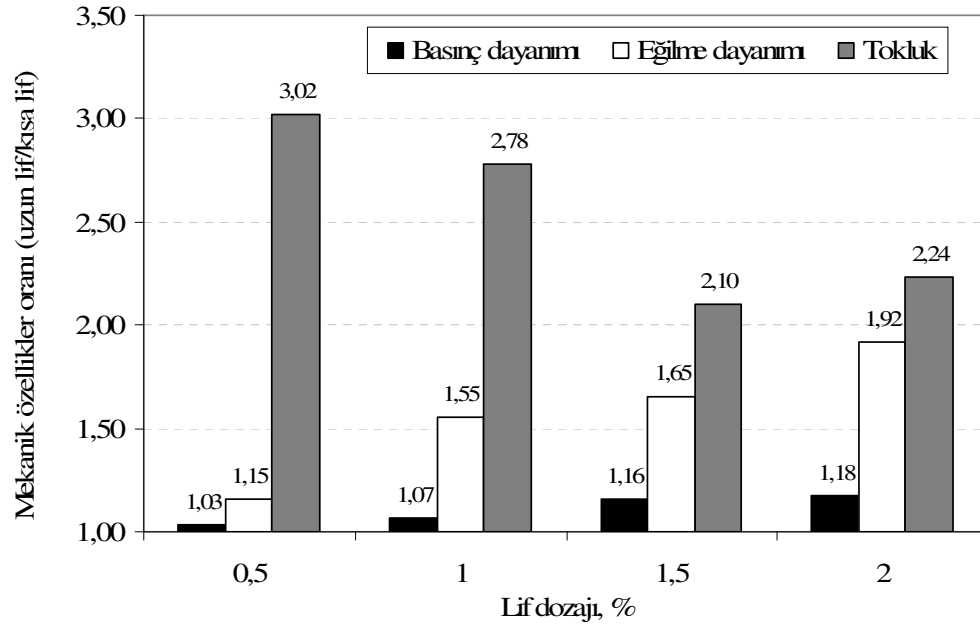


Şekil 7.34 Lifsiz harca kıyasla bağıl eğilme dayanımının lif dozajına bağlı olarak değişimi.



Şekil 7.35 Lifsiz harca kıyasla bağlı tokluk değerinin lif dozajına bağlı olarak değişimi.

Şekil 7.36, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluğun uzun lif kullanımındaki değerinin kısa lif kullanımındaki değerine oranını göstermektedir. Lif dozajındaki artışla uzun lif kullanımıyla basınç ve eğilme dayanımında oluşan artış oranı artarken, tokluktaki artış oranı azalmaktadır.



Şekil 7.36 Uzun lif kullanımı ile kısa lif kullanımına göre mekanik özelliklerdeki artış.

Sonuç olarak, sabit bir lif dozajında 13 mm uzunluğundaki lifler 6 mm uzunluğundaki liflere kıyasla tokluk başta olmak üzere mekanik özellikleri daha fazla geliştirmiştir. Örneğin, %0,5 dozajında 13 mm uzunluğunda lif kullanımı ile elde edilen tokluk %2 oranında 6 mm uzunluğunda lif kullanımıyla elde edilenden bile daha yüksektir. Bir başka deyiş ile, belirli bir tokluk değeri elde edebilmek için bazı durumlarda 13 mm uzunluğundaki liflerin 4 katından daha fazla oranda 6 mm uzunluğunda liflerin kullanımına ihtiyaç olabilir. Lif dozajı kuşkusuz RPC'nin maliyetini belirleyen en önemli kalemdir. Bu nedenle, lif miktarının düşük dozajda tutulması akılcı olacaktır. Bu nedenle, basınç dayanımı bakımından da RPC için verilen sınır değeri sağlayan, %1,5 oranında 13 mm uzunluğundaki liflerin kullanımı yoluna gidilmiştir.

## **7.7 II. Aşama Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi**

Kullanılan mineral katkılardan, F sınıfı UK ve SD işlenebilirliği, C sınıfı UK standart küre, UK (F ve C tipi) ve alçı buhar küreinde dayanımı olumlu yönde etkilemiştir. SD ve MK ikamesi ise dayanımda şiddetli bir azalmaya neden olmuştur. Standart ve buhar küre durumunda kullanılan mineral katkı maddelerinin tümü kuruma büzülmesini azaltmıştır. SD ve MK ikamesi durumunda, çimentolu karışıma kıyasla çok daha fazla boyutsal stabiliteye sahip harçların üretilebileceği görülmüştür.

Hava sürükleyici, köpük önleyici ve büzülme önleyici kimyasal katkılar işlenebilirliği olumlu, dayanımı ise olumsuz yönde etkilemiştir. Büzülme önleyici katkı, büzülme miktarında bir miktar azalma yaratmış olmasına rağmen, büzülmedeki azalma MK ve SD'nin yarattığı etkiyle karşılaştırılamayacak kadar düşük ve önemsiz mertebededir. Diğer kimyasal katkılar ise büzülmeyi arttırmıştır. Bu nedenlerden ötürü, karışım geliştirmeye yönelik deneylerde kimyasal katkı maddelerinin kullanımına gerek duyulmamıştır.

SD ikamesinin sağladığı işlenebilirlik artışı, su/bağlayıcı oranını önemli ölçüde azaltma imkanı sağlamıştır. Agregada olarak kireçtaşı yerine kuvars kullanımı, agrega/bağlayıcı oranının düşürülmesi ve çelik lif kullanımı ile RPC sınıfında

betonların üretilebileceği görülmüştür. Mekanik dayanımlar açısından buhar kürünün otoklav ve standart kürden daha uygun olduğu görülmüştür. YFC yerine %30 silis dumanı ikamesi basınç dayanımı bakımından, %20 silis dumanı ikamesi ise, tokluk ve eğilme dayanımı bakımından en olumlu sonuçları vermiştir. Ayrıca, bu karışımın kuruma büzülmesi buhar kürü durumunda kabul edilebilir sınırlar içinde kalmaktadır.

Maliyet unsuru da göz önünde bulundurularak, YFC yerine nispeten daha düşük oranda silis dumanı ikamesine (%20) ve hacimce %1,5 oranında 13 mm uzunluğunda çelik lif kullanımına karar verilmiştir. Bu karışımın bağlayıcı dozajı  $900 \text{ kg/m}^3$  olup, bağlayıcının %4'ü oranında  $\text{Na}_2\text{O}$  içermektedir ve çözeltinin  $M_s$  değeri 1,2'dir. Bundan sonraki aşamada bu karışımın kullanılmasına karar verilmiştir.

## BÖLÜM SEKİZ

### GELİŞTİRİLEN KARIŞIMIN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Araştırmanın bu aşamasında, önceki bölümdeki veriler ışığında üretimine karar verilen ARPC (Alkalilerle aktivasyon yöntemiyle üretilmiş RPC) karışımının taze hal özellikleri, mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Ayrıca kıyaslama amacıyla bağlayıcısı Portland çimentosu ve silis dumanı olan, diğer tüm bileşenleri ve S/B oranı ARPC karışımı ile aynı olan KRPC (Klasik RPC) karışımı hazırlanmıştır. Bu iki karışımın bileşimi Tablo 8.1’de verilmiştir. ARPC karışımı, bağlayıcı (YFC+SD) ağırlığının %4’ü, YFC ağırlığının ise %5’i oranında Na<sub>2</sub>O içermektedir. Kullanılan çözeltinin M<sub>s</sub> oranı 1,2’dir.

Tablo 8.1 ARPC ve KRPC karışımları için malzeme miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

	<b>ARPC</b>	<b>KRPC</b>
YFC	720,0	--
PÇ	--	720,0
SD	180,0	180,0
Kuvars (1-3 mm)	543,2	575,3
Kuvars (0,6-1,2 mm)	422,5	447,5
Kuvars (0-400 µm)	144,9	153,4
Kuvars (0-75 µm)	96,6	102,3
Çelik lif	117,8	117,8
Cam Suyu	160,0	--
NaOH	30,9	--
Su	49,0	123,0
SA (Glenium ACE 30)	--	50,0
Teorik B.H.A.	2465	2469
Su*/bağlayıcı**	0,17	0,17
Agrega/bağlayıcı**	1,34	1,42

\* kimyasal katkı ve cam suyunun ihtiva ettiği su da dahildir.

\*\* bağlayıcı PÇ+SD veya YFC+SD

## 8.1 Taze Hal Özellikleri ve Reolojik Ölçümler

Hazırlanan harç karışımlarının yayılma özellikleri, birim hacim ağırlığı ve priz süreleri Tablo 8.2’de verilmiştir. Priz süreleri, karışımların hamur fazı üzerinde belirlenmiştir. ARPC karışımının priz süresinin pratik uygulamalar için yeterli olduğu görülmektedir. İki karışımın birim hacim ağırlığı birbirine oldukça yakındır. Her iki karışımında yeterli işlenebilirliğe sahip olmasına rağmen, KRPC karışımının bir miktar daha işlenebilir olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, deneyler esnasında ARPC ve KRPC karışımlarının viskozitelerinin birbirinden farklı olduğu gözlenmiştir. Bu farklılığı ortaya koyabilmek açısından, reometre yardımı ile bu iki karışımın statik ve dinamik reolojik parametreleri belirlenmiştir. Statik reolojik parametreler, reometre bilyesinin karışım içindeki ilk hareketi sırasında ölçülen değerlerdir. Dinamik reolojik parametreler ise, bilyenin karışım içinde sürekli dönmesi sırasında ölçülen değerlerdir. Çelik lifler gibi rijit liflerin kullanıldığı durumda, bilyeli reometrelerde ölçüm limitleri aşılmaktadır. Bu nedenle, ölçümler lifsiz karışımlar üzerinde yapılmış, sonuçları 8.1.1 ve 8.1.2 bölümlerinde sunulmuştur.

Tablo 8.2 ARPC ve KRPC karışımlarının taze hal özellikleri

	<b>ARPC</b>	<b>KRPC</b>
Lifsiz (yayılma-mm)	167	186
Lifli (yayılma-mm)	125	131
Lifli-Gerçek B.H.A (kg/m <sup>3</sup> )	2551	2546
Priz başlangıcı (dakika)	163	Belirlenmedi
Priz sonu (dakika)	198	Belirlenmedi
Sonda batma yüksekliği tabandan (mm)	0	Belirlenmedi

### 8.1.1 Statik Reolojik Parametrelerin Belirlenmesi

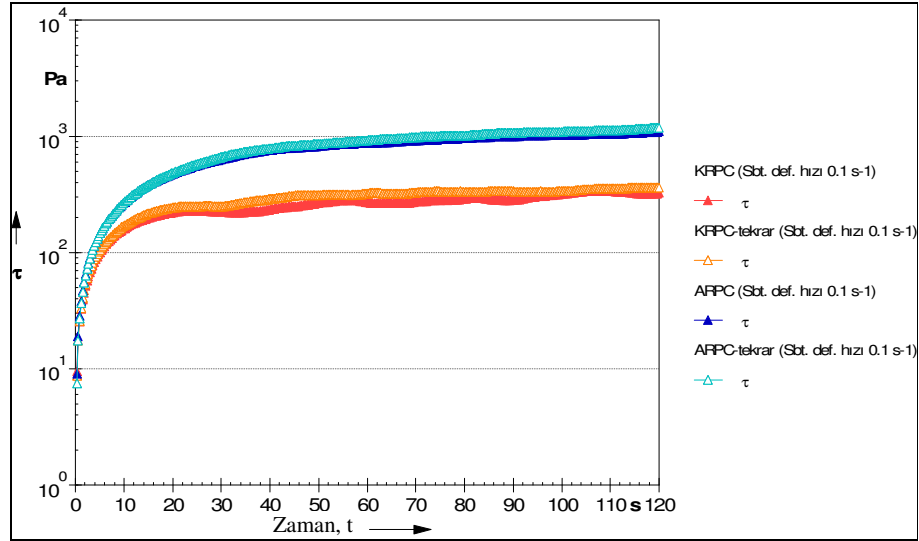
Statik eşik kayma gerilmesi ( $\tau_{o,statik}$ ), karışıma herhangi bir ön işlem uygulanmadan, karışım hazırlandıktan hemen sonraki eşik kayma gerilmesidir. Statik eşik kayma gerilmesinin (EKG) tespitinde, bilye 0,1 s<sup>-1</sup> deformasyon hızında



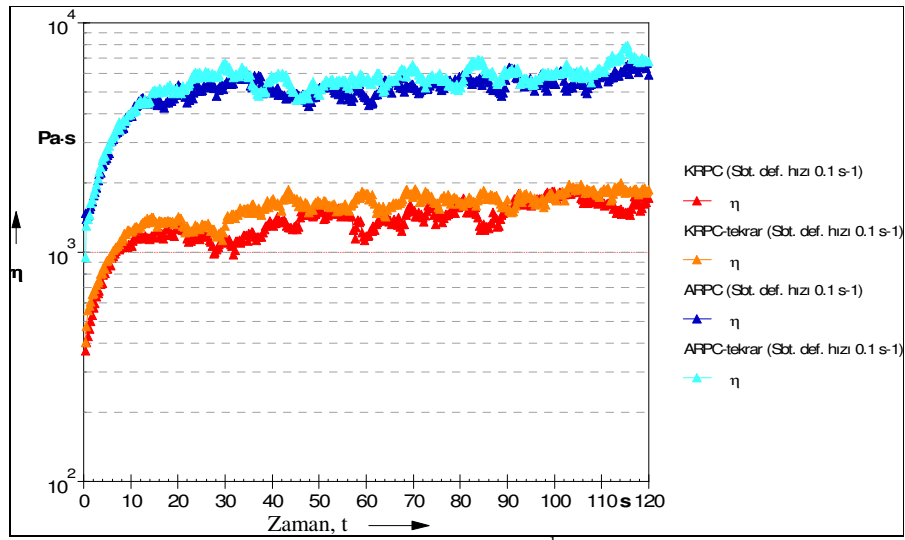
120 saniyede yaklaşık  $\frac{3}{4}$  tur tamamlamaktadır. Böylece bilyenin daha önce hiç sürüklenmediği  $\frac{3}{4}$  turluk bölgede karışımın sürüklenmeye karşı direnci ölçülmektedir. Daha yüksek deformasyon hızları bilye tam turu tamamladığı için kullanılmamaktadır. Aynı yöntemle karışımların anlık viskozite-zaman grafikleri de eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Anlık viskozite değeri çok düşük deformasyon hızlarında karışımların durağan halden harekete geçtikten sonra bilyenin sürüklenmesine karşı gösterdikleri anlık akma direnci olarak düşünülebilir. Sürüklenme anında her karışım için bu değer en yüksek olduğu viskozite değeri başlangıç viskozitesi ( $\eta_{\text{basl}}$ ) olarak alınmıştır (Felekoğlu, 2009).

Şekil 8.1’de başlangıç statik EKG değerlerinin belirlendiği kayma gerilmesi-zaman grafiği, Şekil 8.2’de ise anlık viskozitenin belirlendiği viskozite-zaman grafiği verilmiştir. Başlangıç ölçümünden sonra karışımlar 30 saniye süreyle karıştırılmış ve ölçüm tekrarlanmıştır. Başlangıçta elde edilen eğrinin ARPC ve KRPC karışımlarında karıştırma sonrasında elde edilen grafiklerle önemli derecede benzer olduğu görülmektedir.

Tiksotropi derecesi, karışımların zamana bağlı olarak reolojik parametrelerindeki aşırı değişim ile yakından ilişkilidir. Yüksek tiksotropi dereceli bir karışımda ölçüm tekrarında daha yüksek reolojik parametreler ölçülür. Bu çalışmada incelenen karışımlarda tekrarlar sonucu, benzer reolojik davranış gözlemlendiği için, söz konusu karışımların tiksotropi derecelerinin düşük olduğu söylenebilir. Viskozite-zaman grafiklerinde viskozite değerlerinin anlık olarak önemli derecede dalgalandığı gözlemlenmiştir. Bu durum bilye sürüklenirken karşısına çıkan kum taneciklerinin yarattığı takılmalardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 8.1 Başlangıç statik EKG değerlerinin belirlendiği,  $0,1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızındaki kayma gerilmesi-zaman grafikleri.



Şekil 8.2 Başlangıç viskozitesinin belirlendiği,  $0,1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızındaki viskozite-zaman grafikleri.

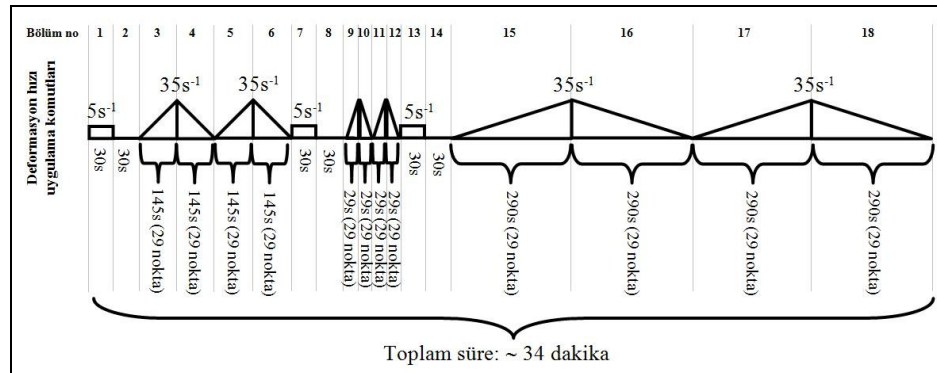
Başlangıç EKG değeri, ölçüm esnasında kayma gerilmesi değeri sürekli olarak arttığı için, 120. saniyedeki değer en büyük kayma gerilmesi değeri ( $\tau_{0,\text{statik, maks}}$ ) olarak alınmıştır. Karışımların başlangıç EKG değerlerinin ve viskozitelerinin değişimi Tablo 8.3'te verilmiştir. Görüldüğü gibi, ARPC karışımının başlangıç EKG değeri KRPC karışımının 3,4 katı, başlangıç viskozitesi ise 3,7 katıdır. Bilyenin KRPC karışımı içinde daha kolay harekete geçmesi, bu karışımın işlenebilirliğinin daha iyi olduğunu sayısal olarak da göstermektedir.

Tablo 8.3 ARPC ve KRPC karışımlarının eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerleri

Karışım	EKG (Pa)		Viskozite (Pa.s)	
	Başlangıç	Karıştırma sonrası	Başlangıç	Karıştırma sonrası
ARPC	1098	1185	6976	7972
KRPC	325	364	1881	2004

### 8.1.2 Akma Eğrilerinin Belirlenmesi

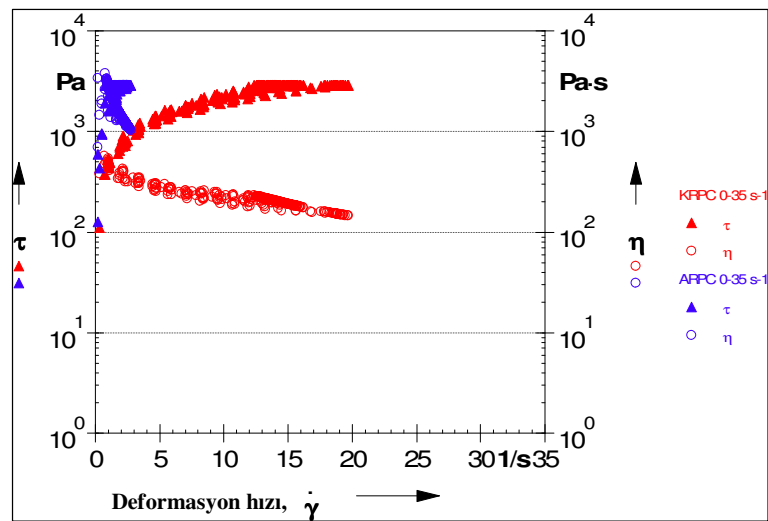
Statik reolojik parametreler, karışımların durağan halden harekete geçmesi sırasındaki reolojik özellikler olup çok düşük deformasyon hızlarında belirlenmiştir. Bu bölümde ise, karışımların farklı ve yüksek deformasyon hızlarında, hareket halindeki davranışları incelenecektir. Bu amaçla, akma eğrileri elde edilecektir. Akma eğrisi, deformasyon hızı değişimi ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki ile ifade edilebilir. Bu eğriler bilyenin dönme hızı belli kurallar dahilinde arttırılıp azaltılarak elde edilmektedir. Akma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan program (makro) “Rheoplus” yazılımı ile hazırlanmıştır. Bu program Felekoğlu (2009) tarafından mikro betonun akma eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmış olup, bu tez kapsamında söz konusu programın en yüksek deformasyon hızının modifiye edilmiş farklı versiyonları ( $35$ ,  $15$  ve  $1 \text{ s}^{-1}$ ) kullanılmıştır. Şekil 8.3'te  $35 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızı için örnek akma eğrisi programı sunulmuştur.



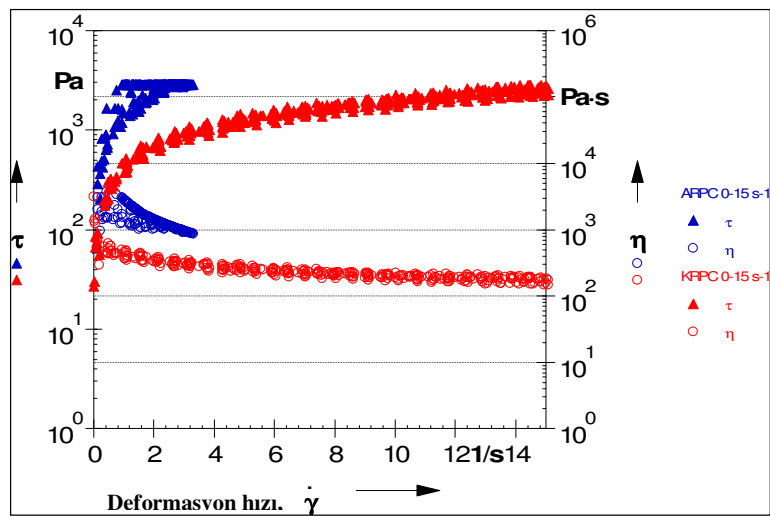
Şekil 8.3 Akma eğrisinin çıkarılmasında kullanılan makro (Felekoğlu, 2009).

Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da sırasıyla  $35 \text{ s}^{-1}$ ,  $15 \text{ s}^{-1}$  ve  $1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızları için eşik kayma gerilmesinin (Pa) ve anlık viskozitenin (Pa.s) deformasyon hızına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Bu akma eğrilerinde, eşik kayma gerilmesi

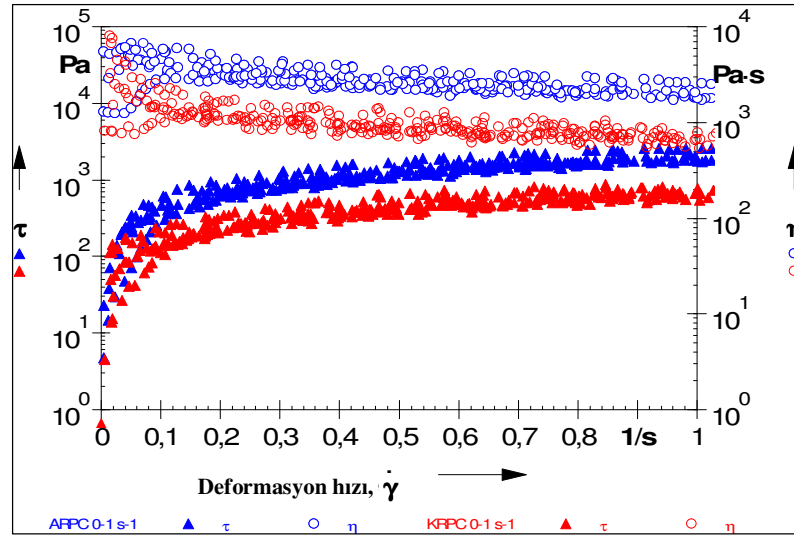
üçgen simgesiyle, anlık viskozite ise daire simgesiyle gösterilmiştir. Grafiklerin her iki y eksenini de logaritmiktir. Şekil 8.4'ten görüldüğü gibi,  $35 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında cihazın okuma yapabileceği sınır eşik kayma direnci olan  $2850 \text{ Pa}$  değeri çok küçük deformasyon hızlarından itibaren aşılmıştır. Bu nedenle, deney  $15 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Bu durumda ise, aynı nedenle ARPC karışımından ölçüm alınamamıştır (Şekil 8.5). Deformasyon hızı  $1 \text{ s}^{-1}$  değerine düşürüldüğünde ise, her iki karışımdan da ölçüm alınabilmiştir (Şekil 8.6).



Şekil 8.4  $35 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında akma eğrileri ham verileri.



Şekil 8.5  $15 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında akma eğrilerinin ham verileri.



Şekil 8.6  $1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında akma eğrilerinin ham verileri.

Akma eğrileri,  $35 \text{ s}^{-1}$  ve  $15 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızlarında tam olarak elde edilemediği için, modellemede  $1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında elde edilen veriler kullanılmış ve Herschel Bulkley modeli uygulanmıştır. Felekoğlu (2009) tarafından yapılan çalışmalarda, bu modelin çimento hamuru, mikro beton ve harçları modellemede oldukça uygun sonuçlar verebildiği tespit edilmiştir. Bu model, değişken viskoziteli karışımların modellenmesine imkan sağlamaktadır. Her akma eğrisi için aşağıdaki bağıntı kullanılarak ayrı ayrı regresyon analizi gerçekleştirilmiştir.

$$y = a + bx^p \quad (8.1)$$

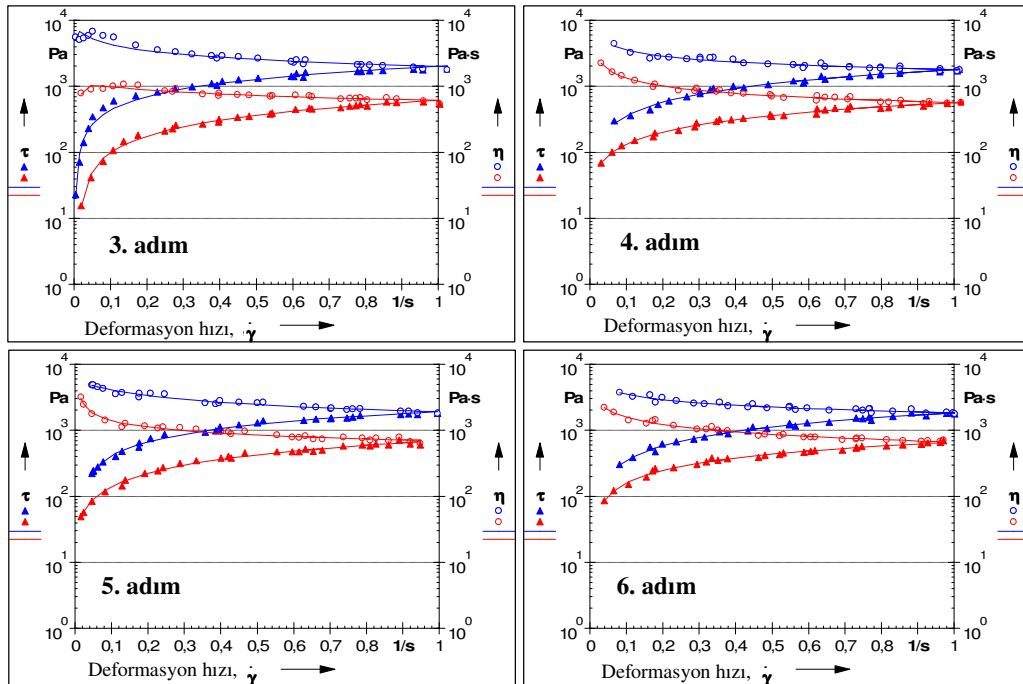
$$\tau = \tau_{o,dinamik} + b\dot{\gamma}^p \quad (8.2)$$

$\tau$ : belli bir deformasyon hızındaki kayma gerilmesi (Pa),  $\tau_o$ : dinamik EKG (Pa),  $\dot{\gamma}$ :deformasyon hızı (1/s), b ve p ise model katsayılarıdır. p viskozitenin deformasyon hızından nasıl etkilendiğini göstermekte olup, 1 den büyükse deformasyon sertleşmesi, küçükse deformasyon yumuşaması, 1'e eşit ise viskozitenin deformasyon hızından bağımsız olduğunu gösterir.

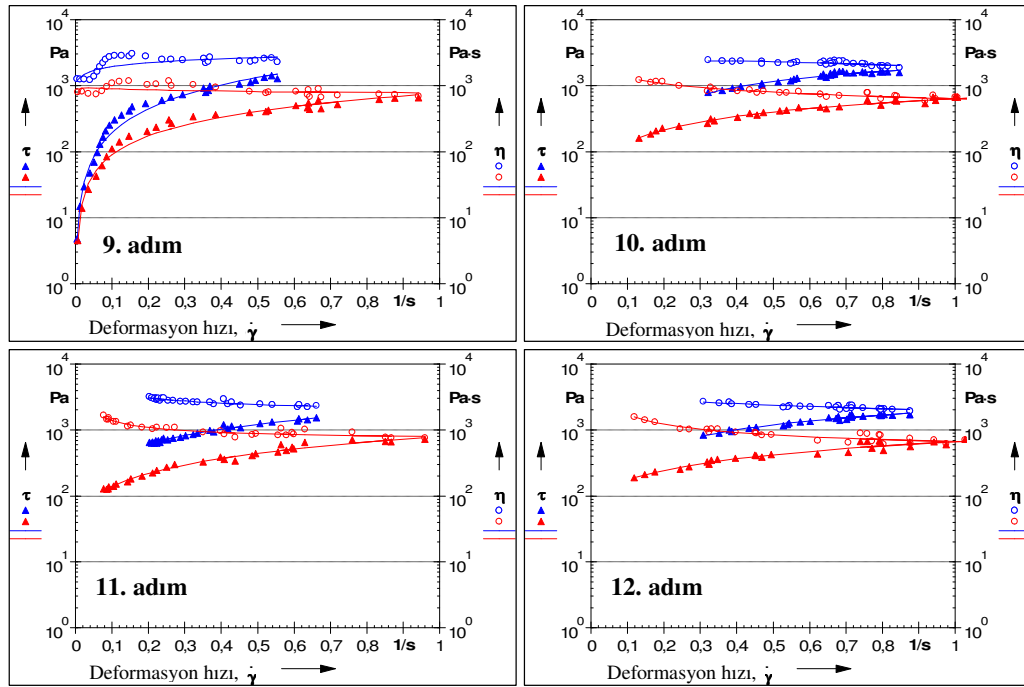
Herschel Bulkley modelinde deformasyon hızının sonsuz değerinde, viskozitenin sabitlendiği ( $\eta_{inf}$ ) kabulü ile plastik viskozite şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$\eta_{inf} = \mu = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \quad (8.3)$$

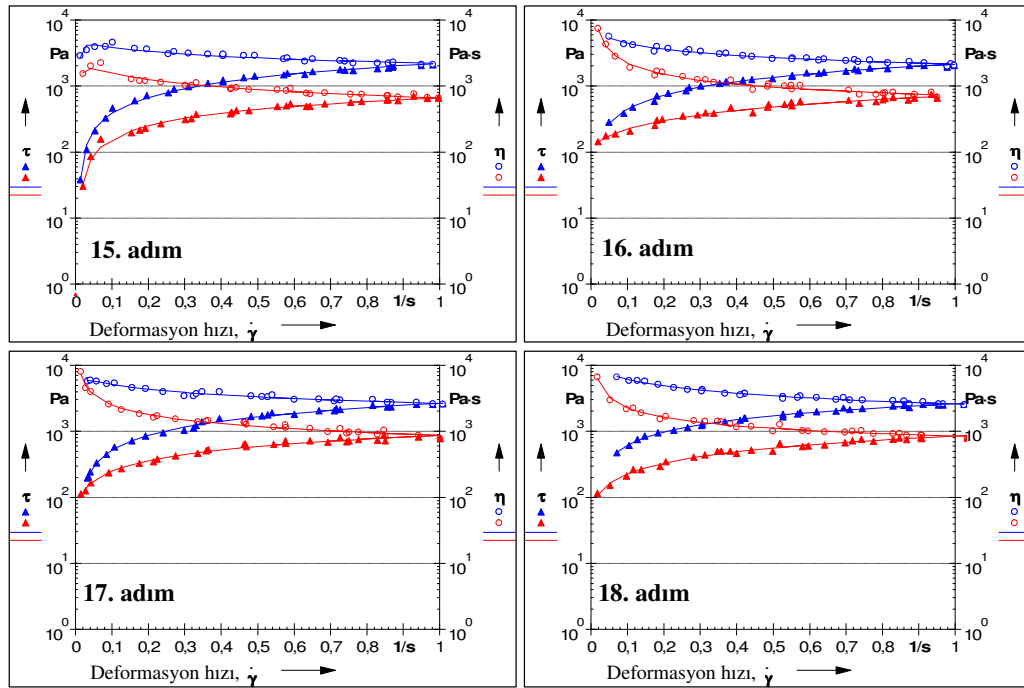
Şekil 8.7’de normal hızda deformasyon artış ivmelenmesi durumunda Herschel Bulkley modeli eğrileri verilmiştir. Noktalar ham verileri, noktalar üzerinden geçen eğriler ise modeli simgelemektedir. Hem ARPC hem de KRPC karışımında viskozite deformasyon hızının artışı ile azalmaktadır. Bir başka deyişle, “deformasyon yumuşaması” davranışı görülmektedir. Hızlı (Şekil 8.8) ve yavaş (Şekil 8.9) deformasyon hızlarında da aynı davranışın hakim olduğu görülmüştür.



Şekil 8.7 ARPC ve KRPC karışımlarının deformasyon artış hızı ivmelenmesi normal durumda Herschel Bulkley model eğrileri (mavi:ARPC, kırmızı:KRPC,  $1s^{-1}$ ).

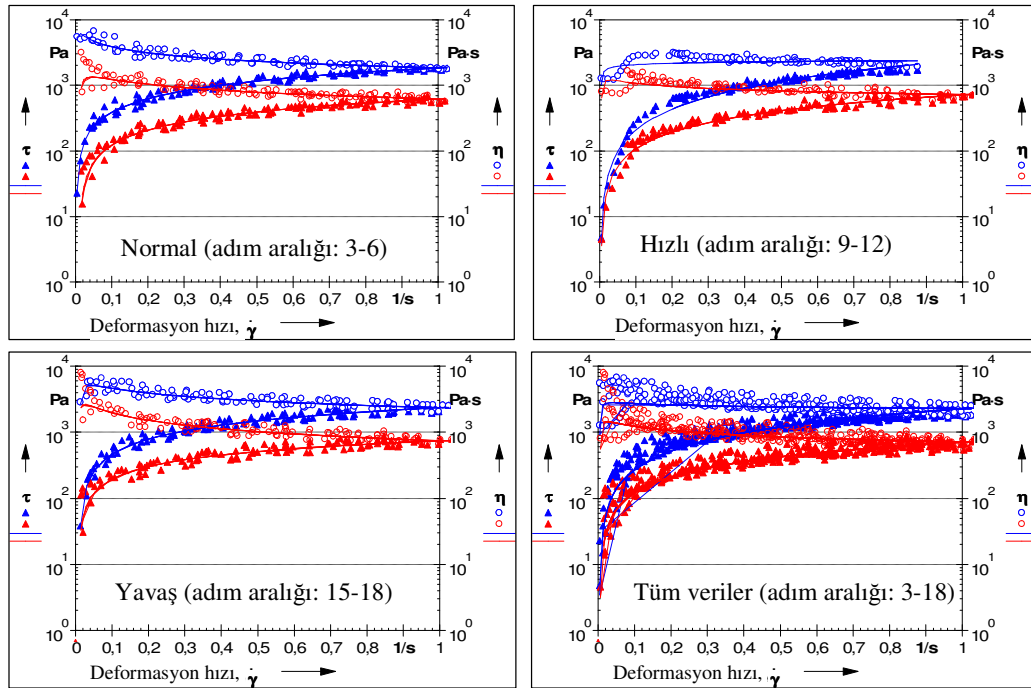


Şekil 8.8 ARPC ve KRPC karışımlarının deformasyon artış hızı ivmelenmesi hızlı durumda Herschel Bulkley model eğrileri (mavi:ARPC, kırmızı:KRPC,  $1s^{-1}$ ).



Şekil 8.9 ARPC ve KRPC karışımlarının yavaş deformasyon artış hızı ivmelenmesi durumda Herschel Bulkley model eğrileri (mavi:ARPC, kırmızı:KRPC,  $1s^{-1}$ ).

Şekil 8.10'da normal deformasyon artış hızı ivmelenmesi (3-6. adımlar arası), hızlı deformasyon artış ivmelenmesi (9-12. adımlar arası), yavaş deformasyon artış hızı ivmelenmesi (15-18. adımlar arası) ve tüm veriler kullanılarak (3-18. adımlar arası) oluşturulan Herschel Bulkley modeli eğrileri verilmiştir. Gruplandırılmış veriler kullanıldığında da her iki karışımın deformasyon yumuşaması davranışı gösterdiği görülmektedir.



Şekil 8.10 ARPC ve KRPC karışımlarının farklı deformasyon artış hızı ivmelenmesi durumlarında Herschel Bulkley model eğrileri (mavi:ARPC, kırmızı:KRPC,  $1s^{-1}$ ).

Tablo 8.4'te  $1 s^{-1}$  deformasyon hızında Herschel Bulkley modelinden elde edilen dinamik eşik kayma gerilmesi ve viskozite değerleri verilmiştir. Herschel Bulkley modeli analizi sonucunda her model için eğrinin y eksenini kestiği nokta dinamik eşik kayma gerilmesi ( $\tau_{0, \text{dinamik}}$ ) olarak adlandırılmıştır. Akış eğrilerinde çoğu durumda viskozite değerlerinin yaklaşık olarak sabit bir değer aldığı görülmektedir. Bu değer karışımın plastik viskozitesi ( $\mu$ ) olarak kabul edilmiştir. Dinamik eşik kayma gerilmelerinin ve viskozite değerlerinin statik duruma kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Dinamik EKG değerinin negatif olması fiziksel olarak anlamsız olup, pratikte sıfır kabul edilebilir. EKG değerinin düşüklüğü karışımların kendiliğinden hareket edebilme ve yerleşebilme potansiyellerinin yüksek olduğunu



gösterir. Bu çalışmada kullanılan karışımların plastik viskozite değerlerinin oldukça yüksek olması akma eğrilerinin eğimlerini arttırmış ve bu nedenle Herschel Bulkley modeliyle elde edilen eğriler y eksenini negatif değerlerde kesmiştir. Nihai viskozite değerlerinin aynı deney adımı için ARPC karışımında KRPC karışımına kıyasla 2,6 ile 3,3 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, geliştirilen karışımların oldukça viskoz ancak sıkışabilme derecesi de yüksek karışımlar olduğu söylenebilir. Söz konusu karışımlardan alınan örneklerin kalıp yüzeylerinde de bu reolojik özelliklerin getirdiği boşluksuz kalıp yüzeyi gözlenmiştir.

Deformasyon hızına bağlı olarak ARPC karışımının EKG ve plastik viskozite değerleri sırasıyla 0-150 Pa ve 1700-2700 Pa.s aralığında, KRPC karışımının ise sırasıyla 0-100 Pa ve 500-900 Pa.s aralığındadır (Tablo 8.4). Sadece normal yükleme koşulları dikkate alınır, ARPC karışımı 0-30 Pa EKG ve 1800-2000 Pa.s plastik viskozite değerleri vermiştir. Diğer taraftan KRPC daha düşük EKG (0-20 Pa) ve plastik viskozite (500-750 Pa.s) değerleri göstermiştir. Deformasyon hızı arttırıldığı durumda, çoğu akma eğrisi için EKG ve plastik viskozite değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Kohezif karışımlarda artan deformasyon hızına karşılık artan direnç durumu gözlenebilmektedir. Çünkü kohezif karışımlarda moleküller arası etkileşim daha fazla olup, karışıma uygulanan kayma gerilmesi düşük kohezyonlu bir karışıma kıyasla daha geniş bir alana yayılmaktadır. Genel eğilim incelendiğinde (hıza göre gruplanmış veriler) eşik kayma gerilmesinin tüm durumlarda sıfır olduğu, ARPC ve KRPC karışımlarının plastik viskozite değerlerinin ise, sırasıyla 1800-2400 Pa.s ve 600-750 Pa.s aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, her iki karışım da kendi ağırlığıyla bile rahatlıkla hareket etmektedir. Ancak, KRPC karışımının hareket hızının ARPC'ye kıyasla biraz daha fazla olduğu söylenebilir. Pratik uygulamalar açısından değerlendirildiğinde, ARPC'nin işlenebilirliğinin biraz daha düşük olması olumsuz yönü olarak, kuma eğiliminin daha düşük olması ise olumlu yönü olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, yüksek viskozitesi karışımın bünyesine dışarıdan su girişini önemli ölçüde sınırlandıracağından, su içerisinde beton dökümü işleri için ARPC'nin oldukça uygun olacağı düşünülmektedir.

Tablo 8.4  $1 \text{ s}^{-1}$  deformasyon hızında  $\tau_o$ , dinamik ve  $\eta_{inf}$  değerleri

Adım no	$\tau_o$ , dinamik (Pa)		$\eta_{inf}$ (Pa.s)	
	ARPC	KRPC	ARPC	KRPC
3	---	---	1990	613
4	29,29	16,92	1780	562
5	---	16,23	1910	721
6	---	---	1860	670
9	0,73	---	2720	780
10	---	3,65	2210	638
11	142,90	54,31	2310	802
12	---	71,50	2210	660
15	---	---	2220	671
16	---	101,06	2160	740
17	---	37,07	2660	895
18	---	54,23	2580	837
3-6	---	---	1830	617
9-12	---	---	2390	702
15-18	---	---	2340	731
3-18	---	---	2270	681

\* modelden elde edilen değer negatiftir. Sıfır kabul edilebilir.

## 8.2 Mekanik Özellikler

Karışımların mekanik özellikleri Tablo 8.5'te verilmiştir. Basınç dayanımı 32, eğilme dayanımı ve tokluk 16, silindir yarma dayanımı ve elastisite modülü ise 3 numune üzerinde belirlenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve tokluk için değişkenlik katsayısının her iki karışım için de yaklaşık %7 olduğu görülmüştür. ARPC ve KRPC karışımlarının basınç ve silindir yarma dayanımlarının benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ARPC karışımının eğilme dayanımı ve tokluğu KRPC karışımına kıyasla daha yüksekken, elastisite modülü daha düşüktür. Poisson oranları da her iki karışım için benzerdir.

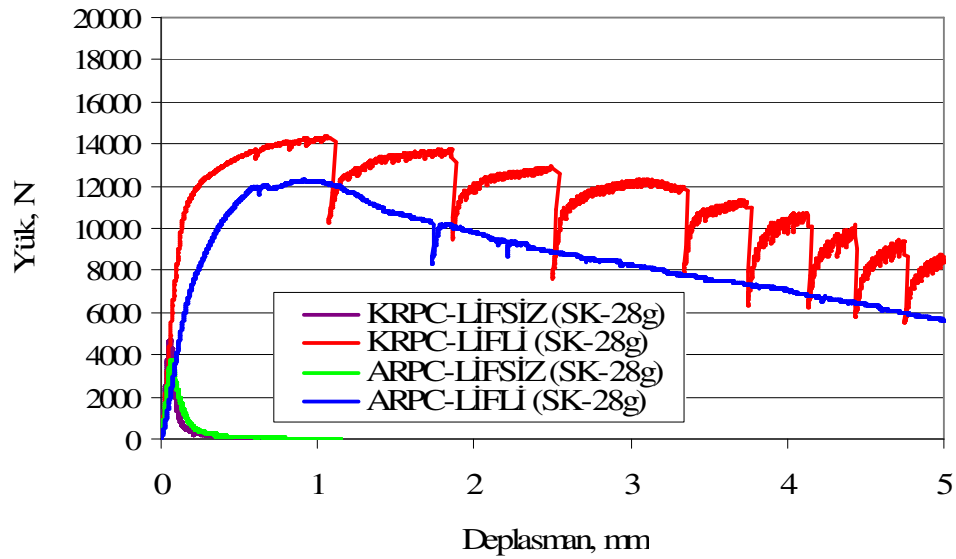
Tablo 8.5 ARPC ve KRPC karışımlarının mekanik özellikleri

	ARPC	KRPC
Basınç dayanımı, MPa	215,9	214,6
Eğilme dayanımı, MPa	42,2	33,9
Tokluk, N.mm	25341	22307
Silindir yarma dayanımı, MPa	19,2	19,5
Elastisite modülü, GPa	84,1	114,0
Poisson oranı	0,22	0,21

### 8.3 Kırılma Enerjisi

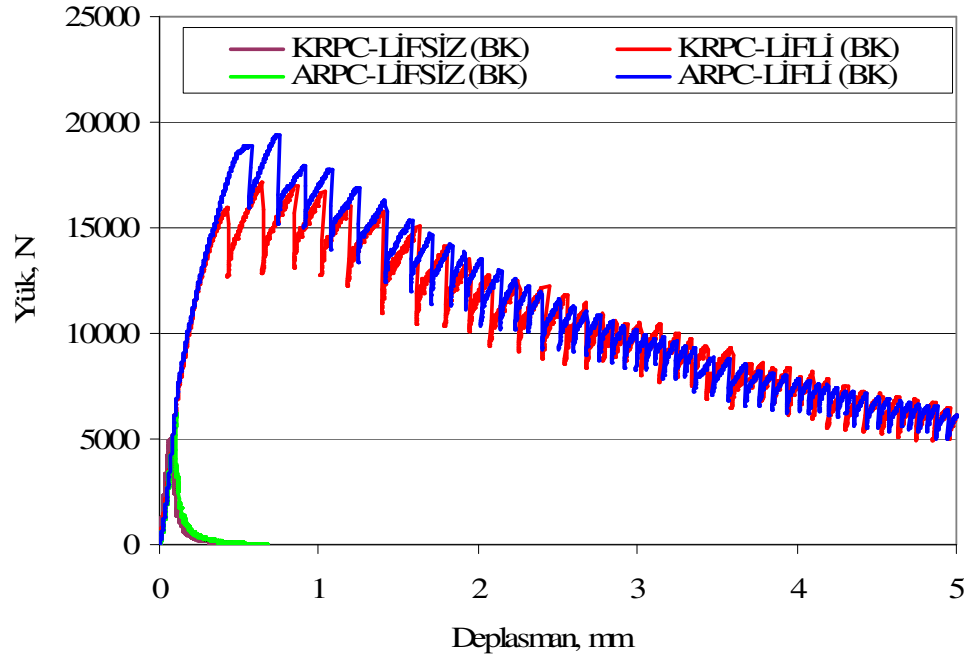
Kompozitlerin kırılma enerjisi Bölüm 5.2.8’de aktarılan yöntemle çentikli kırış numuneleri üzerinde belirlenmiştir.

Standart su kürü geçirmiş ARPC ve KRPC karışımlarının lifli ve lifsiz durumda yük-deplasman eğrileri Şekil 8.11’de verilmiştir. Lifli durumda, KRPC karışımının ulaştığı maksimum yük seviyesinin ARPC karışımına kıyasla daha yüksek olduğu ve KRPC karışımında kuvvetli lif-matris aderansının hakim olduğu görülmektedir.



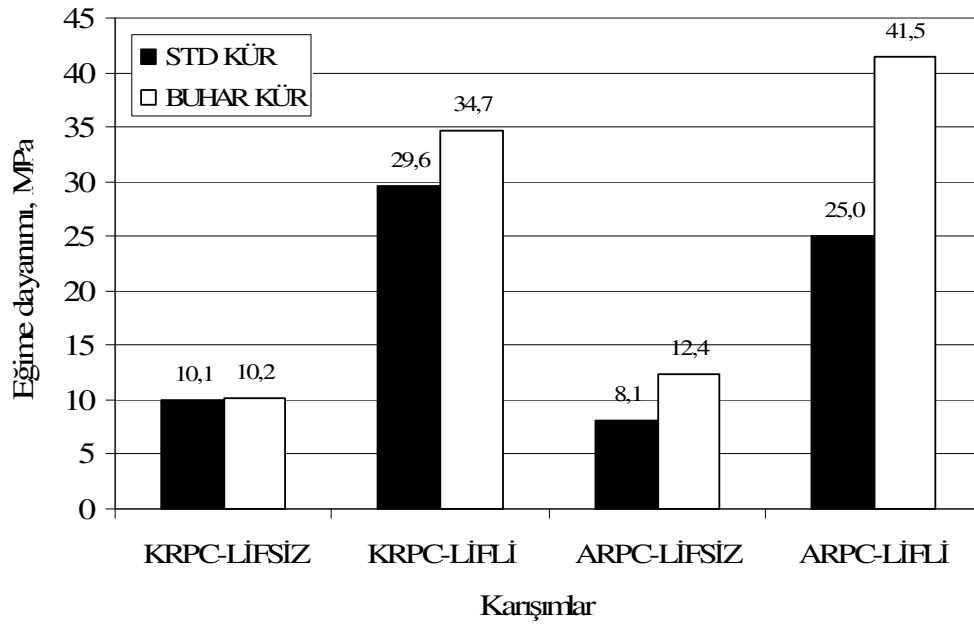
Şekil 8.11 Standart kür geçirmiş ARPC ve KRPC karışımlarının yük-deplasman eğrileri.

Şekil 8.12’de buhar kürü geçirmiş ARPC ve KRPC karışımlarının lifli ve lifsiz durumda yük-deplasman eğrisi verilmiştir. Standart su küründen farklı olarak, buhar kürü durumunda ARPC’nin ulaştığı yük mertebesinin KRPC’den daha fazla olduğu görülmektedir. Lif-matris aderansı bakımından incelendiğinde her iki karışımda da grafikte ani iniş ve çıkışlar olduğu görülmektedir. Bu durum, daha önce de ifade edildiği gibi lif-matris aderansının güçlü olduğuna işaret etmektedir.

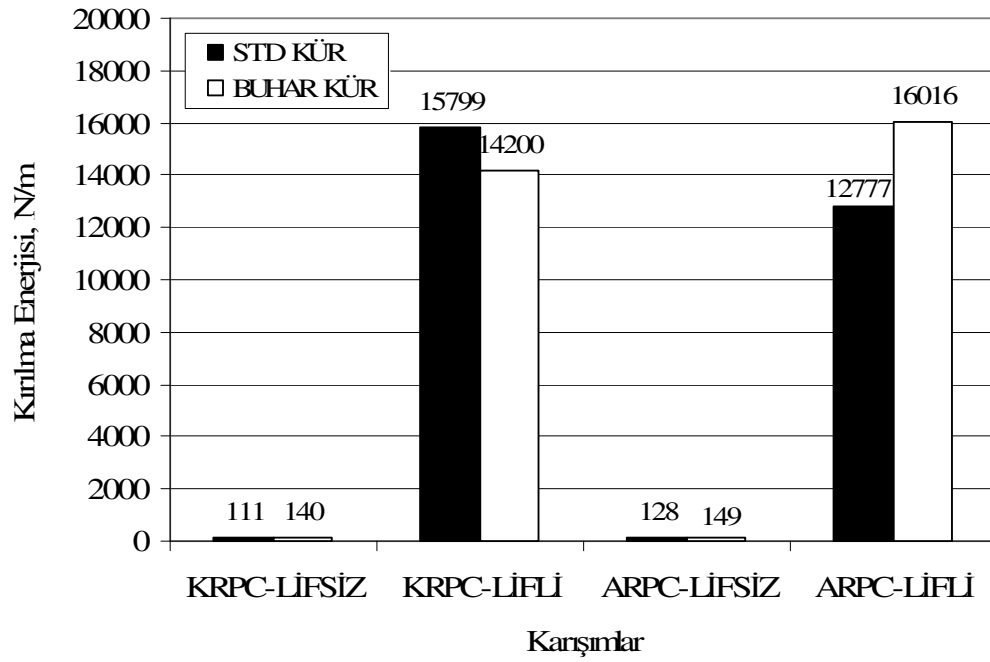


Şekil 8.12 Buhar kürü geçirmiş ARPC ve KRPC karışımlarının yük-deplasman eğrileri.

Şekil 8.13’te eğilme dayanımının kür türüne ve karışıma bağlı olarak değişimi verilmiştir. ARPC karışımının eğilme dayanımının standart kür durumunda KRPC’den daha düşük, buhar kürü durumunda ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Kırılma enerjisi bakımından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte, KRPC karışımının eğilme dayanımı buhar kürü uygulandığında standart küre kıyasla daha yüksek olmasına rağmen, bu karışımın kırılma enerjisi standart kür durumunda buhar küründen daha yüksek olarak bulunmuştur (Şekil 8.14). Bu durum, standart kür durumunda eğrinin alçalan kısmının eğiminin buhar kürüne kıyasla daha düşük olmasıyla ilgilidir.



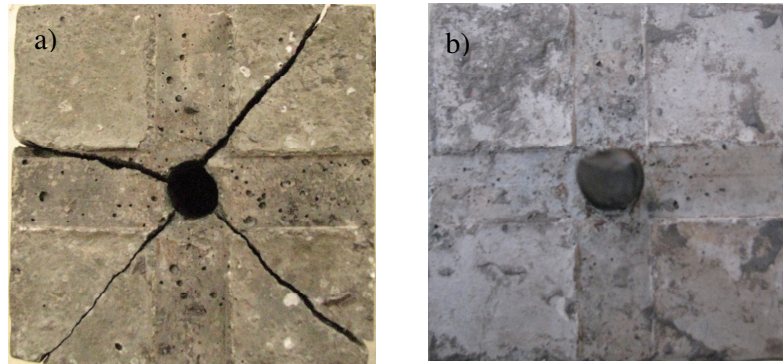
Şekil 8.13 Eğilme dayanımının kür türüne ve karışıma bağlı olarak değişimi.



Şekil 8.14 Kırılma enerjisinin kür türüne ve karışıma bağlı olarak değişimi.

#### 8.4 Çelik Donatıya Aderans

Çelik donatıya aderans deneyleri, ayrıntıları Bölüm 5.2.11’de verilen yöntemle yapılmıştır. Çapı 20 mm, aderans boyu 70 mm olan nervürlü S 420 sınıfı çeliklere lifsiz buhar kürü uygulanmış ARPC ve KRPC karışımlarının aderansı incelenmiştir. KRPC karışımı yük seviyesi 15,4 tona ulaştığında parçalanmıştır. Buna karşılık ARPC karışımı içerisindeki donatının aderans deneyinde, betonda herhangi bir hasar oluşmamış, yük 21 tona yükseldiğinde ise donatı kopmuştur (Şekil 8.15). Sonuç olarak, ARPC karışımının KRPC karışımına kıyasla donatıya çok daha iyi aderans yeteneğine sahip olduğu söylenebilir.



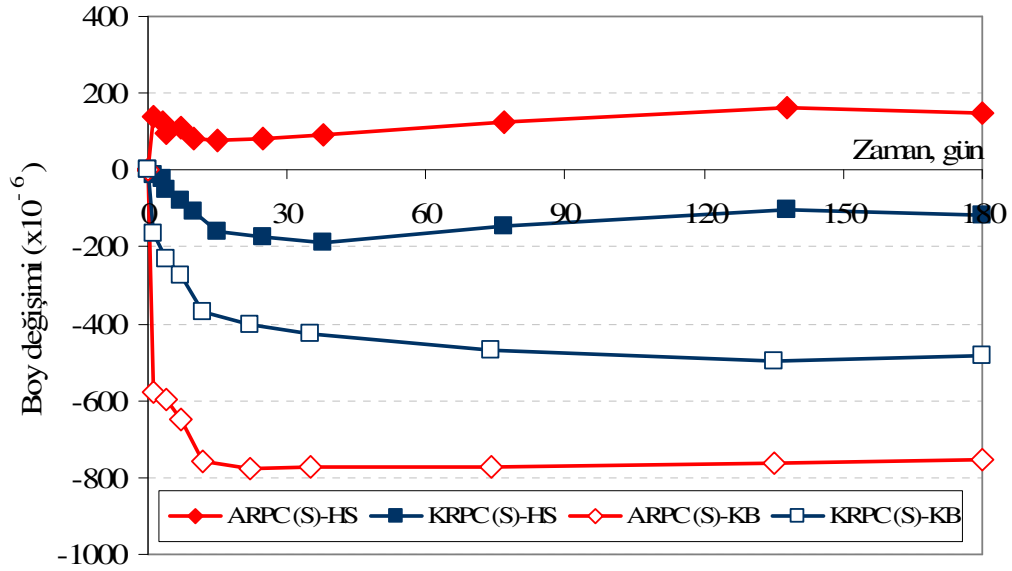
Şekil 8.15 Aderans deneyi kırılma formu a) KRPC, b) ARPC

#### 8.5 Boyutsal Stabilite

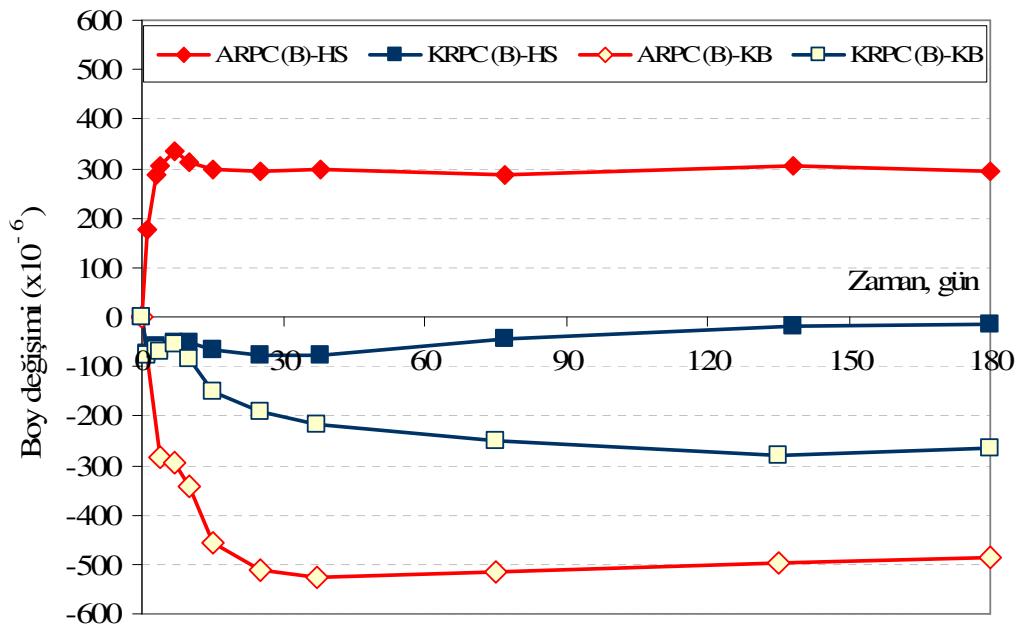
Şekil 8.16’da kalıptan söküldükten sonra 2 gün suda bekletilen ve daha sonra havada bekletilen numunelerin kuruma büzülmesi (KB), ve sürekli olarak su içerisinde bekletilen numunelerin hacim sabitliği (HS) deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 8.17’de ise buhar kürü sonrasında havada ve suda bekletilen numuneler için sonuçlar verilmiştir. Deneyin ayrıntıları Bölüm 5.2.6’da sunulmuştur.

KRPC her iki kür durumunda da suda bekletildiğinde büzülme göstermiştir. Bu durum, bu karışımın yüksek çimento içeriği ve düşük S/B oranının bir sonucu olup, otojen büzülmeye işaret etmektedir. ARPC karışımı ise, her iki kür durumunda da su içerisinde şişme davranışı göstermiş olup, buhar kürü geçirmiş numunelerde bu etki daha şiddetli olmuştur. Buhar kürü hem ARPC karışımında, hem de KRPC

karişımında kuruma büzülmesini azaltmıştır. ARPC'nin kuruma büzülmesi Bölüm 6.4'te verilen alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen diğer harçlarla kıyaslandığında, oldukça düşük düzeydedir. Ayrıca, Bölüm 6.4'teki yaklaşımla  $1200 \times 10^{-6}$  civarındaki kuruma büzülmesi deformasyonları bu kompozitler için kabul edilebilirdir. Bu durumda, gerek standart gerekse buhar kürü durumunda kuruma büzülmesi deformasyonlarının verilen limitin altında kaldığı görülmektedir.



Şekil 8.16 Standart koşullarda ARPC ve KRPC karişımının boyutsal stabilite eğrileri.



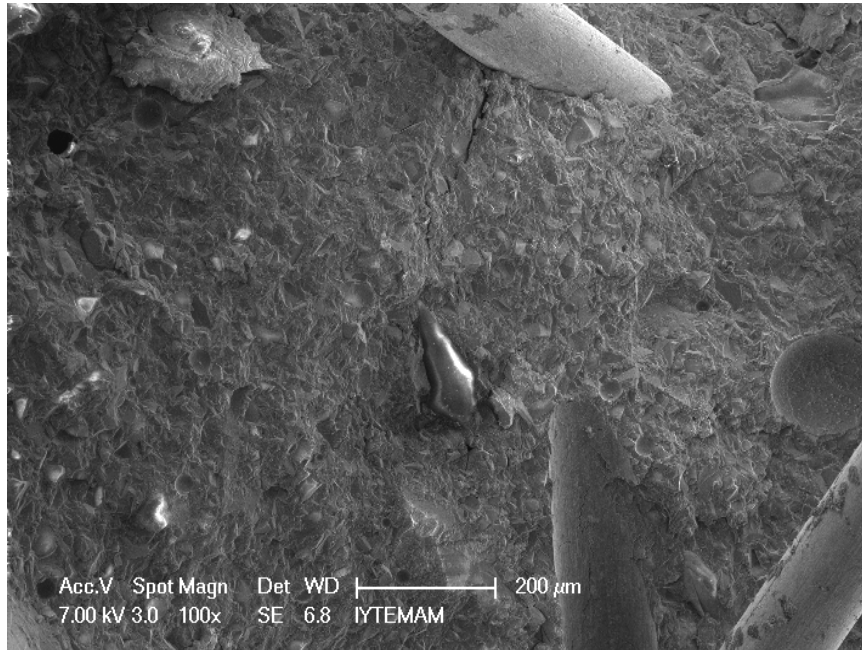
Şekil 8.17 Buhar küründe durumda ARPC ve KRPC karişımının boyutsal stabilite eğrileri.

## 8.6 Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri, SEM (SE) modunda kırık yüzey incelemelerini, SEM (BSE) modunda parlak yüzey incelemelerini, XRD analizlerini, termal analiz incelemelerini ve boşluk boyutu dağılımı incelemelerini kapsamaktadır. Termal analizler standart ve buhar kürü geçirmiş karışımlar üzerinde, diğer analizler ise sadece buhar kürü geçirmiş karışımlar üzerinde yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri hakkında detaylı bilgi Bölüm 5.2.12’de verilmiştir.

### 8.6.1 Kırık Yüzey İncelemeleri

Şekil 8.18’de ARPC karışımının düşük bir büyütme oranında (100x) görüntüsü verilmiştir. Yoğun matris yapısının yanında, küresel boşluklar, lif ve lifin sıyrıldığı noktalar görülmektedir.

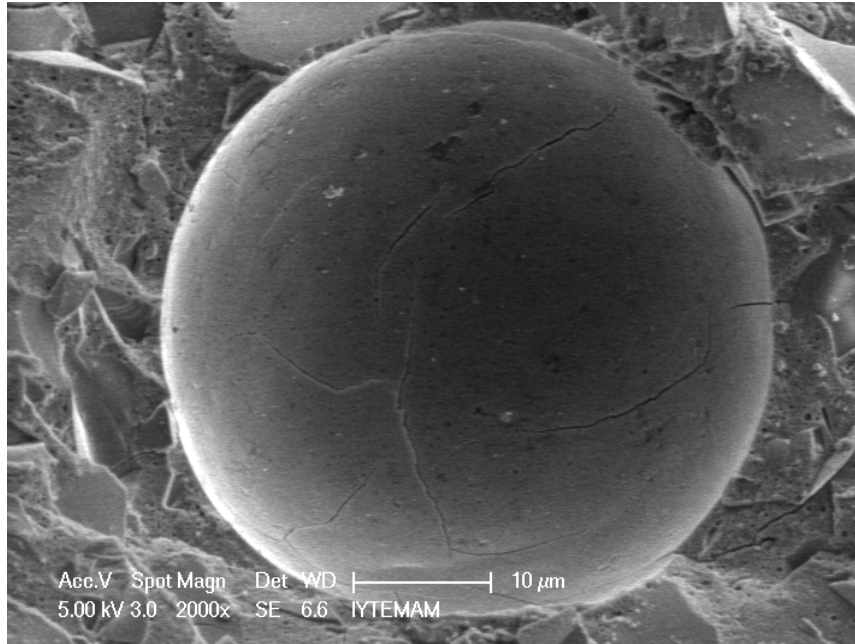


Şekil 8.18 ARPC karışımı SEM (SE) görüntüsü - 100x.

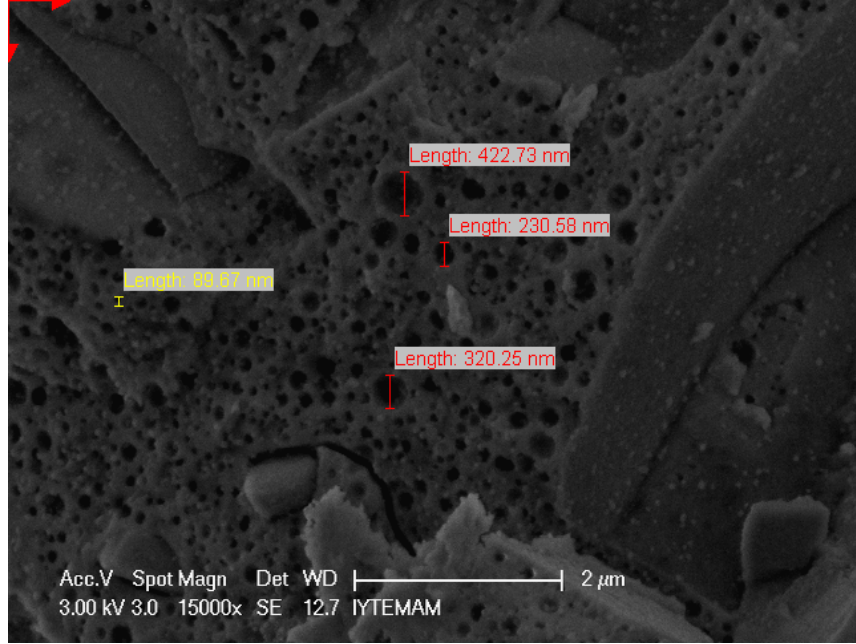
Şekil 8.19’da ARPC karışımının matrisi içindeki hava boşluklarından birisi görülmektedir. Boşluk yüzeyinde çok ince boyutlu kılcal çatlakların mevcut olduğu görülmektedir.



Şekil 8.20’de yüksek büyütme oranlarında (15000x) ARPC karışımının matris yapısı görülmektedir. Matriste küresel, birbiriyle büyük oranda bağlantısız, nanometre boyutunda çok sayıda boşluğun bulunduğu görülmektedir. Bu derece yüksek miktarda boşluk içermesine rağmen, bu karışımdan elde edilen mekanik özelliklerin oldukça yüksek olması, matrisin kendisinin çok güçlü olduğunu göstermektedir. Tablo 8.6’da çeşitli noktalarda yapılan EDS analizi sonuçları verilmiştir. Agregaya yakın olarak ifade edilen EDS analizi, agregadan 50  $\mu\text{m}$  ötedeki analizi, uzak olarak ifade edilen analiz ise 200  $\mu\text{m}$  ötedeki analizi ifade etmektedir. Matrisin genelini oluşturan gözenekli yapı üzerinde yapılan EDS analizi, Ca/Si oranının oldukça düşük (0,39) olduğunu göstermiştir (Tablo 8.6). Burada, C-S-H’in bağlayıcılık özelliğinin Ca/Si oranının azalmasıyla arttığını bir kez daha belirtmekte fayda vardır (Bakharev, Sanjayan, Cheng, 2000). Yüksek boşluk oranına rağmen yüksek mekanik özelliklerde bu sonucu doğrular niteliktedir.

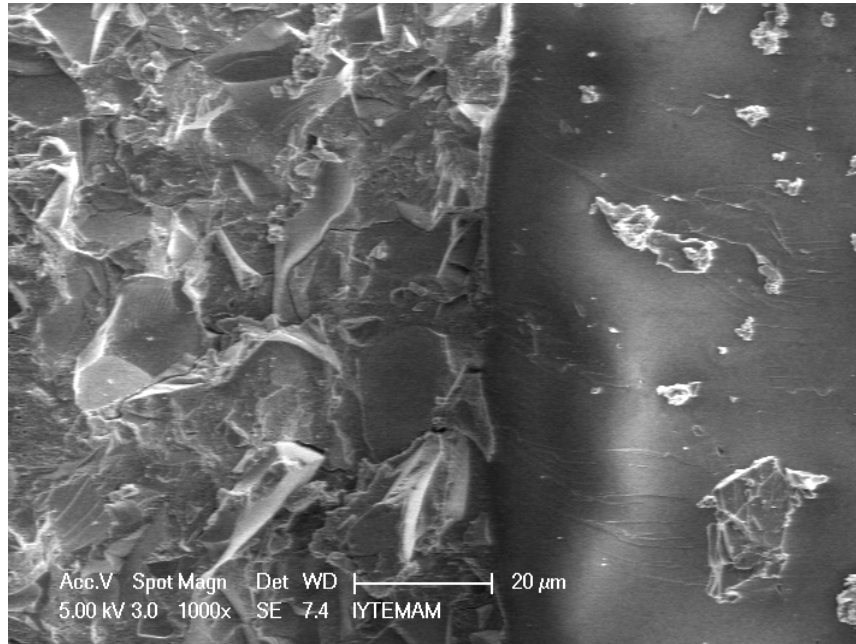


Şekil 8.19 ARPC karışımı SEM (SE) görüntüsü-boşluk.

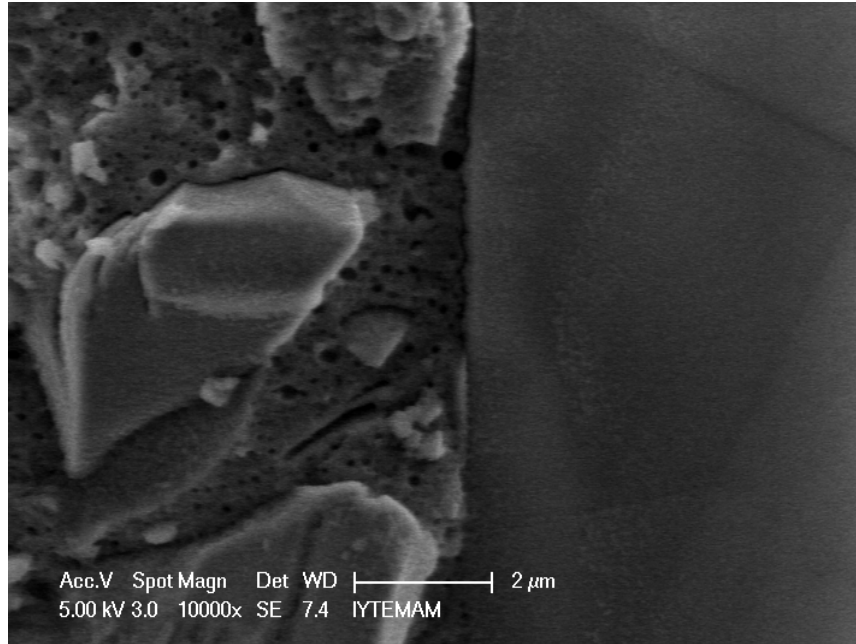


Şekil 8.20 ARPC karışımı matris SEM (SE) görüntüsü - 15000x.

Şekil 8.21 ve 8.22’de ARPC karışımında matris-agrega ara yüzeyi görülmektedir. Geçiş bölgesinin oluşmadığı ve matrisin agrega yakınında ve uzağında benzer özellikler taşıdığı görülmektedir.



Şekil 8.21 ARPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (SE) görüntüsü - 1000x.

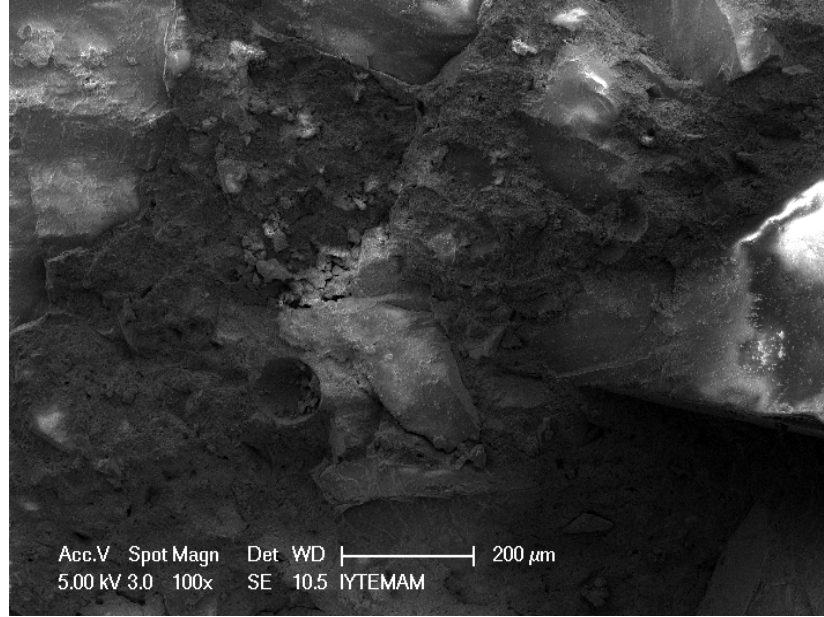


Şekil 8.22 ARPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (SE) görüntüsü - 10000x.

Tablo 8.6 ARPC karışımının matrisin çeşitli noktaları üzerinde yapılan EDS analizi sonuçları

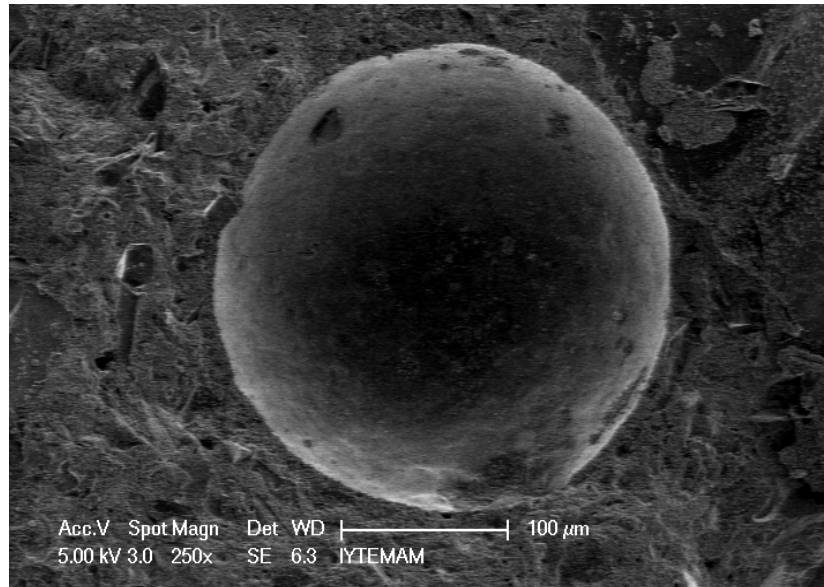
	Agregaya yakın (1)	Agregaya yakın (2)	Agregaya uzak (1)	Agregaya uzak (2)	Boşluk yüzeyi	Lif kenarı	Gözenekli yapı
O	38,97	46,03	39,09	48,31	42,98	38,20	44,65
Na	2,30	3,77	1,98	2,98	2,65	2,15	3,41
Mg	1,86	1,44	2,18	1,71	1,78	2,57	1,82
Al	2,31	2,20	2,99	2,92	1,93	3,49	2,76
Si	33,23	34,23	30,39	26,33	23,67	28,48	31,48
S	0,70	0,54	0,74	0,58	1,36	0,94	0,53
Cl	0,56	0,30	0,00	0,24	0,21	0,45	0,19
K	1,52	1,17	0,65	1,22	1,16	1,88	1,41
Ca	17,43	9,22	11,20	14,32	13,21	20,09	12,39
Fe	1,10	1,11	0,74	1,38	11,05	1,75	1,36
Ca/Si	0,52	0,27	0,37	0,54	0,56	0,71	0,39

Şekil 8.23'te KRPC karışımının düşük bir büyütme oranında (100x) görüntüsü verilmiştir. Yoğun matris yapısının yanında, ARPC karışımındaki benzer küresel hava boşlukları görülmektedir.

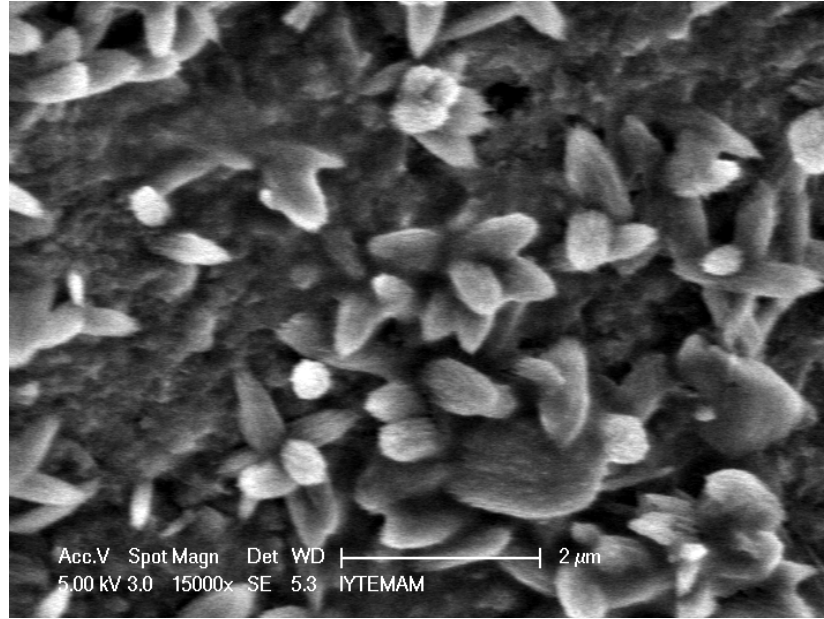


Şekil 8.23 KRPC karışımı SEM (SE) görüntüsü - 100x.

Şekil 8.24'te KRPC'nin matrisi içindeki küresel boşluklardan birisi görülmektedir. Boşluk yüzeyinde çok ince kılcak çatlaklar mevcuttur. Ancak, ARPC'ye kıyasla çatlak daha azdır. Şekil 8.25'te KRPC karışımının matris yapısı görülmektedir. Matrisin çeşitli noktalarında yapılan EDS analizleri C-S-H yapının Ca/Si oranının (1,3-2,7 arasında) ARPC'ye kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir.

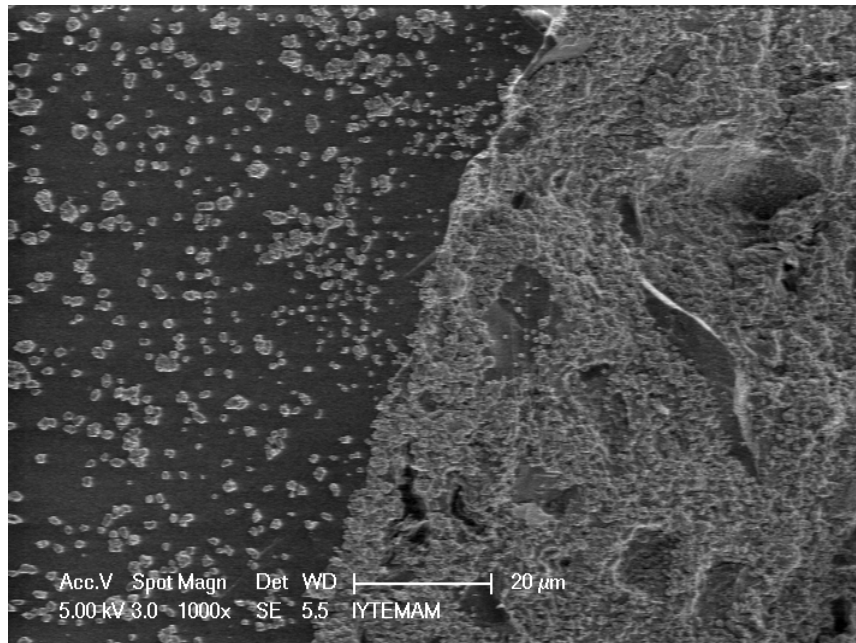


Şekil 8.24 KRPC karışımı SEM (SE) görüntüsü-boşluk.

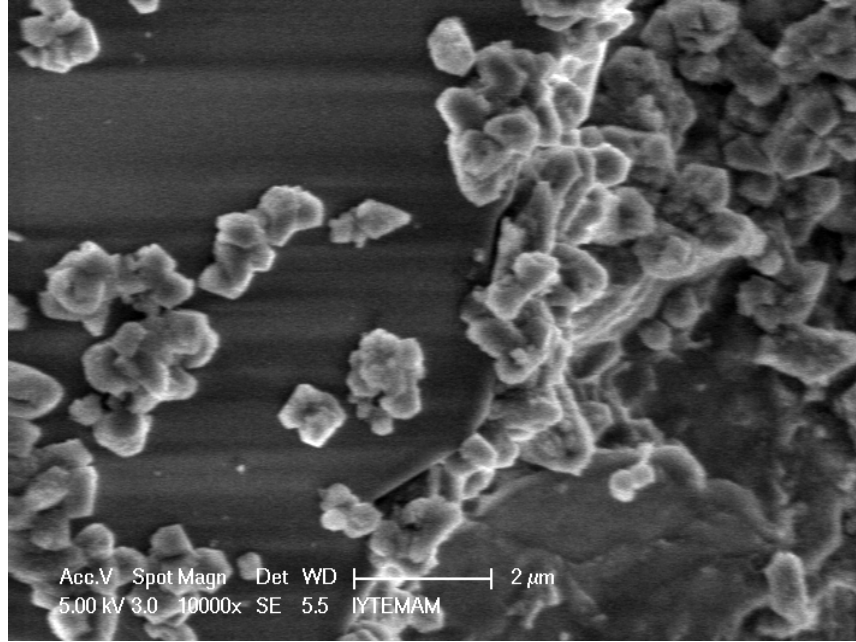


Şekil 8.25 KRPC karışımı matris SEM (SE) görüntüsü matris - 15000x.

Şekil 8.26 ve 8.27’de KRPC karışımının agrega – matris ara yüzeyi görülmektedir. Ara yüzey oldukça güçlü görünmektedir.



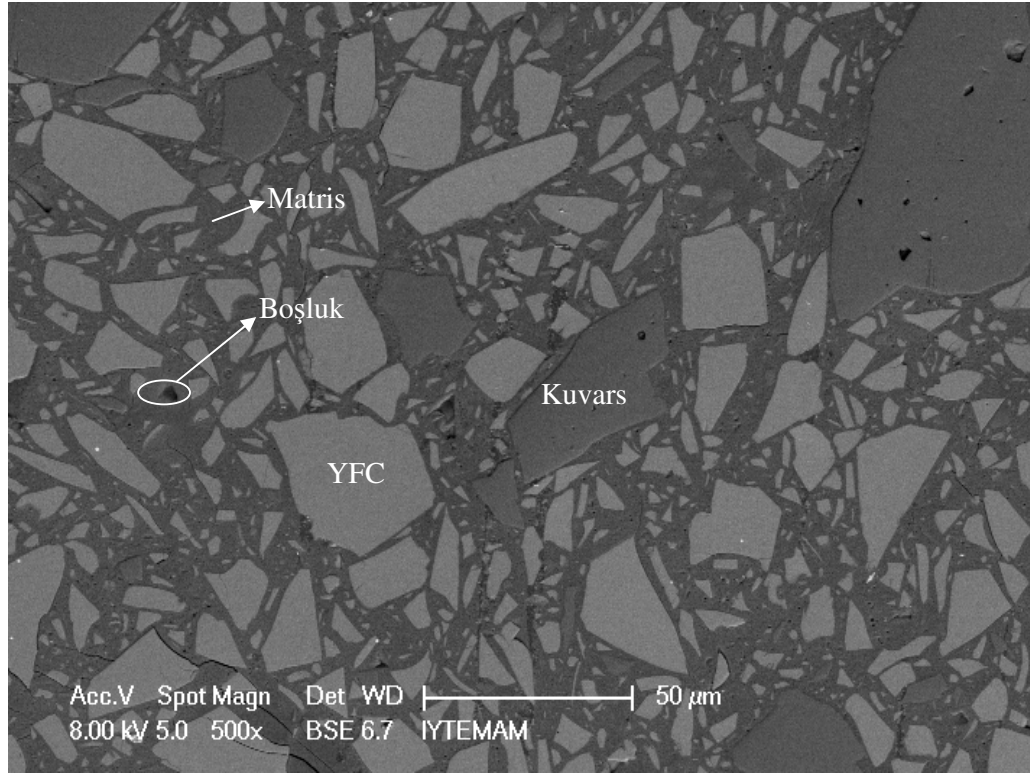
Şekil 8.26 KRPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (SE) görüntüsü - 1000x.



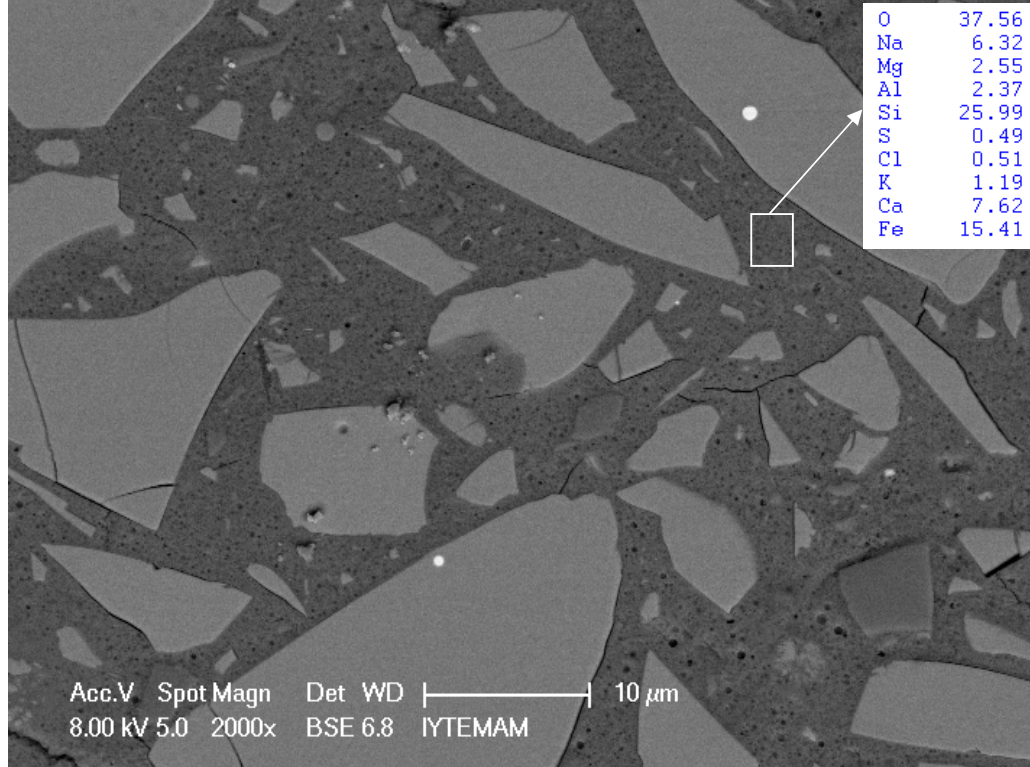
Şekil 8.27 KRPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (SE) görüntüsü - 10000x.

### 8.6.2 Parlak Yüzey İncelemeleri

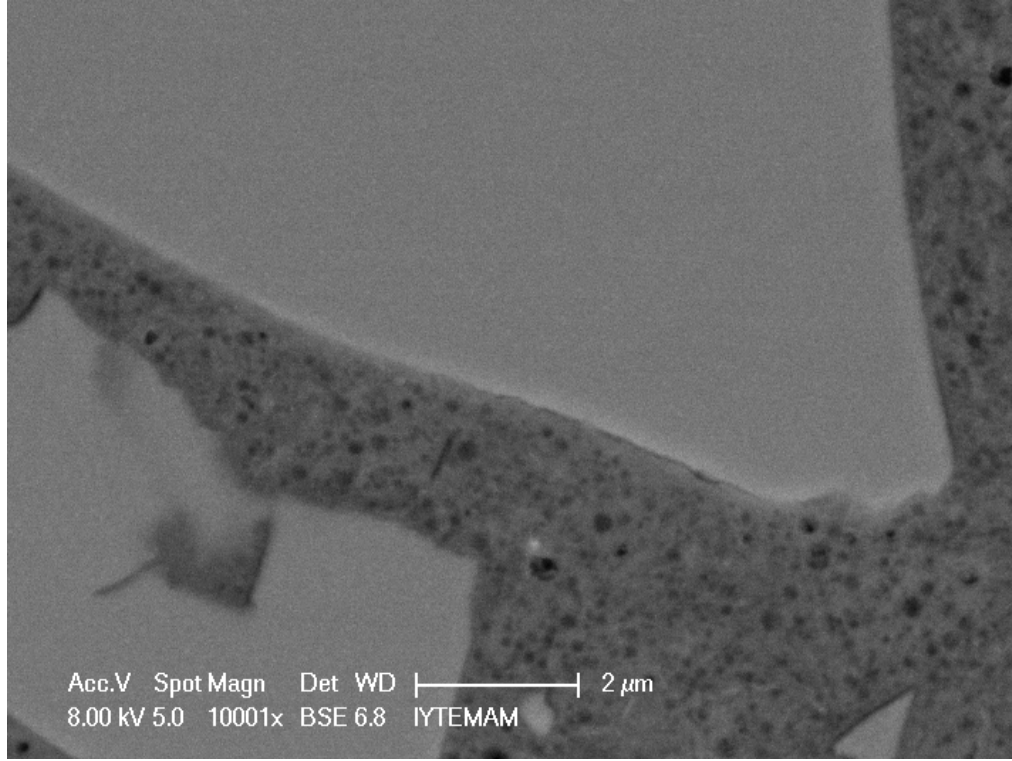
Şekil 8.28’de 500 kat, Şekil 8.29’da ise 2000 kat büyütme oranında, ARPC karışımındaki agrega, matris ve hidrate olmamış YFC taneleri görülmektedir. Açık renkli taneler hidrate olmamış YFC tanelerini, koyu renkli taneler ise kuvars agregası tanelerini göstermektedir. Arada kalan koyu renkli kısım hidrate olmuş matris fazıdır. Matris içindeki siyah bölgeler ise boşluktur. Şekil 8.29’da YFC tanelerinin bazı noktalarda çatladığı görülmektedir. Bu çatlakların matris fazında da devam ettiği görülmektedir. Ayrıca, kırık yüzey incelemelerinde de görülen matristeki nanometre boyutunda boşluklar dikkati çekmektedir. Şekil 8.29’daki işaretli bölge üzerinde yapılan EDS analizinden Ca/Si oranının oldukça düşük ve 0,29 civarında olduğu, Na içeriğinin ise %6,32 olduğu görülmektedir. Kırık yüzey incelemelerinde Ca/Si oranının 0,39, Na içeriğinin ise %3,41 olduğu görülmektedir. Parlak yüzey üzerindeki EDS analizi ile, kırık yüzeydekinin farklılığı göze çarpmaktadır. Şekil 8.30’da YFC-matris ara yüzeyi, Şekil 8.31 ve Şekil 8.32’de ise agrega-matris ara yüzeyi görülmektedir. Hem YFC-matris ara yüzeyinin hem de agrega-matris ara yüzeyinin oldukça kuvvetli olduğu görülmektedir. Şekil 8.33’te ise matrisin yüksek büyütme oranında görünümü verilmiştir.



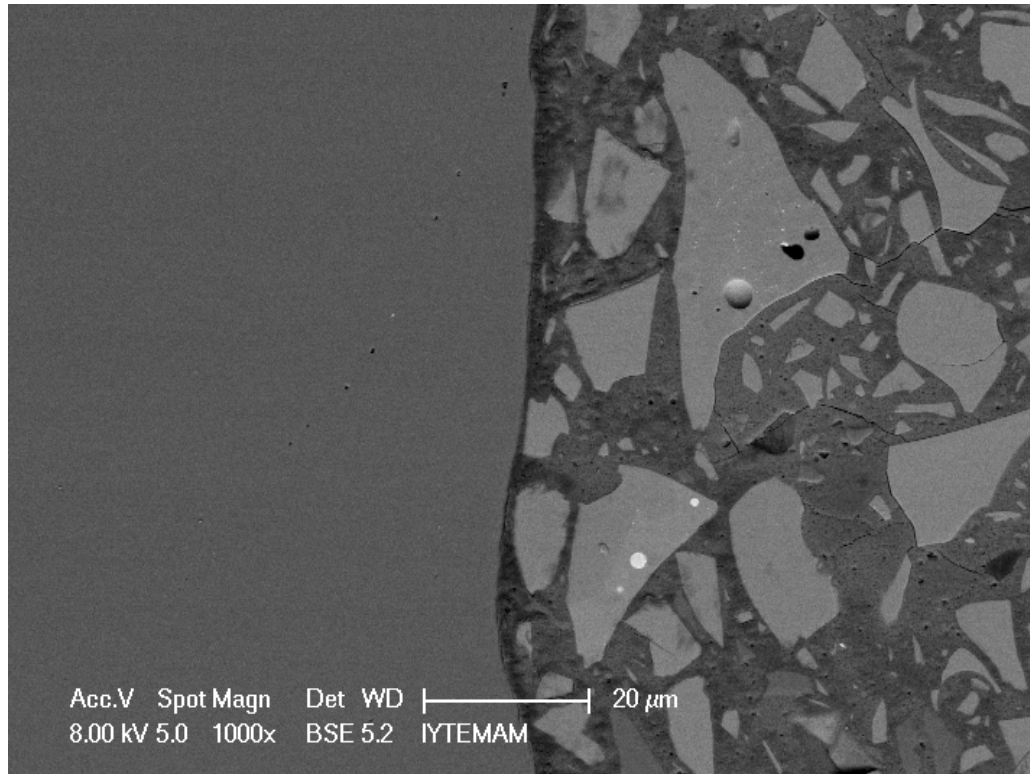
Şekil 8.28 ARPC karışımı SEM (BSE) görüntüsü - 500x.



Şekil 8.29 ARPC karışımı SEM (BSE) görüntüsü - 2000x.

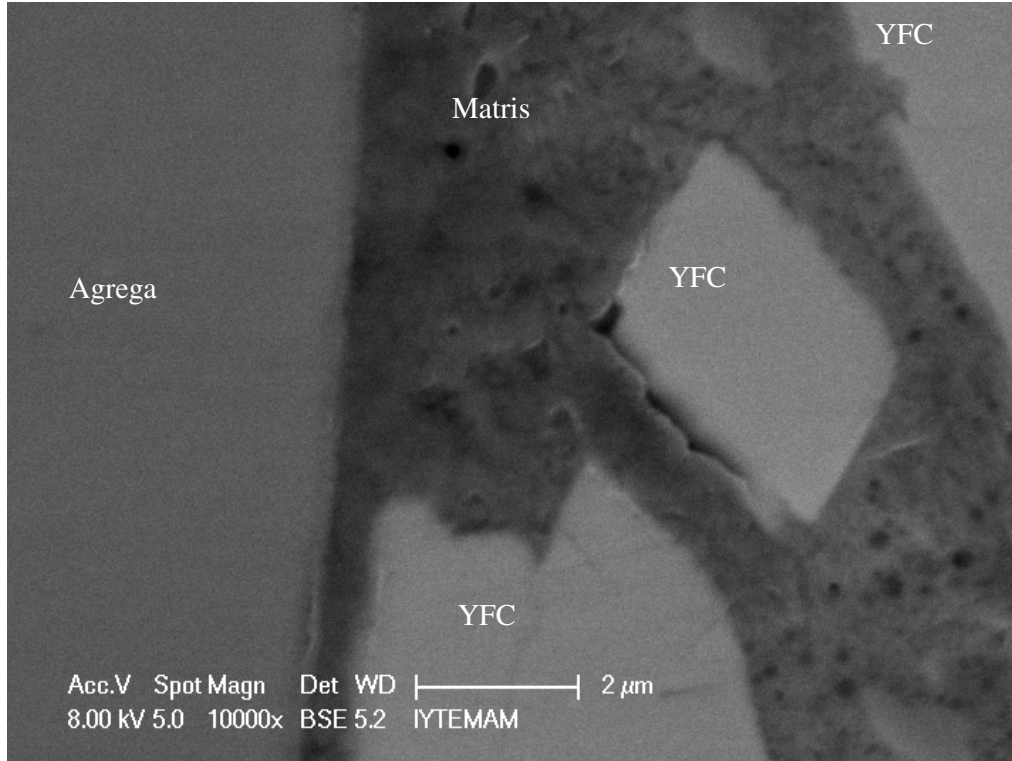


Şekil 8.30 ARPC karışımı YFC-matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü.

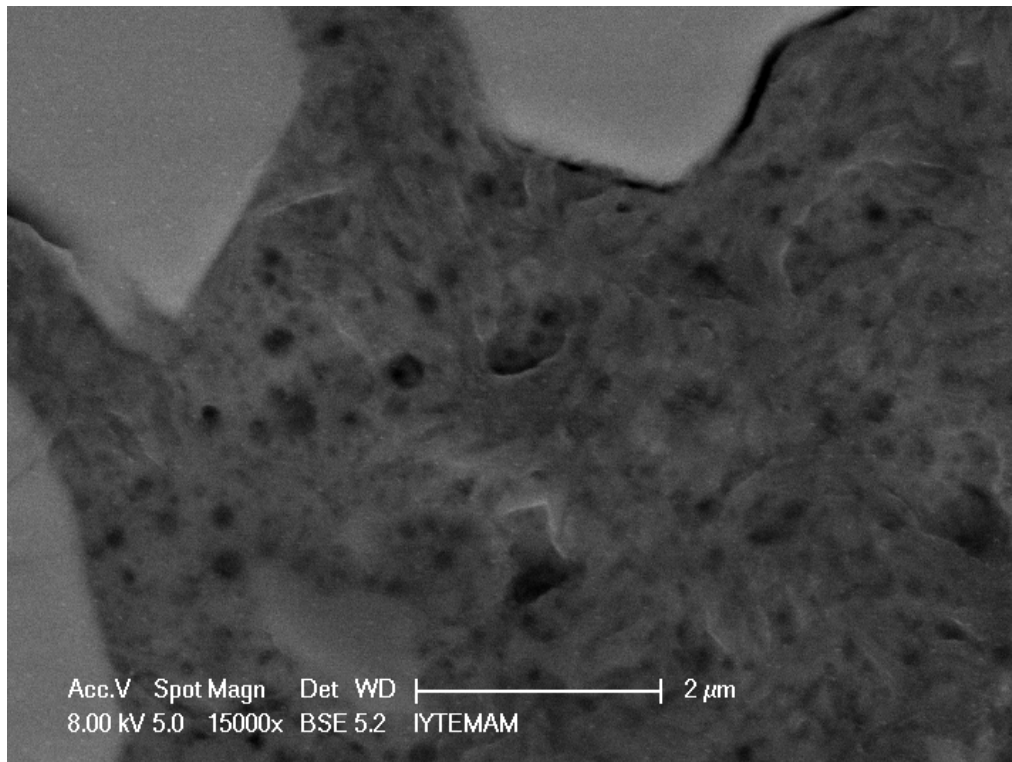


Şekil 8.31 ARPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü - 1000x.



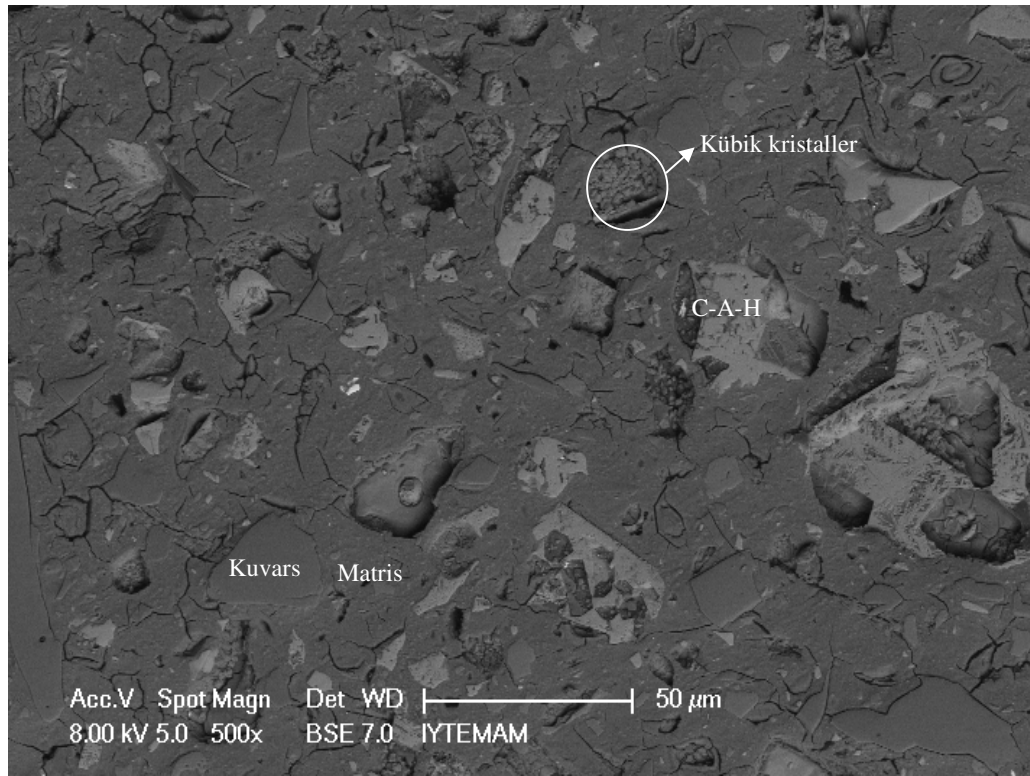


Şekil 8.32 ARPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü - 10000x.

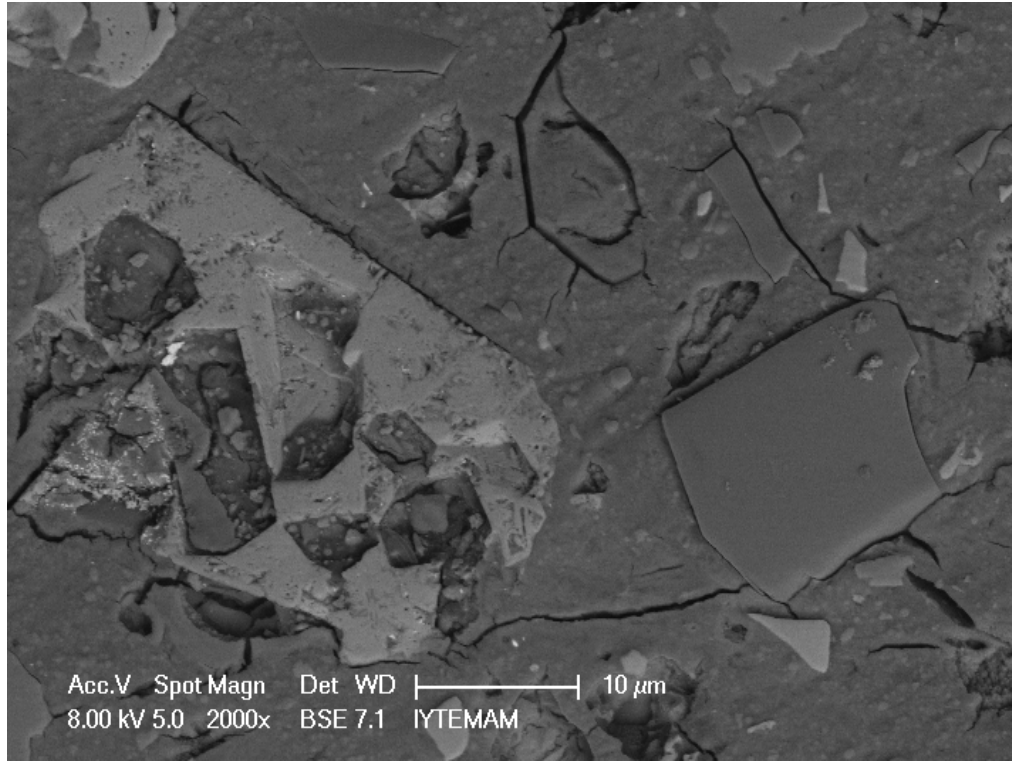


Şekil 8.33 ARPC karışımı matris SEM (BSE) görüntüsü - 15000x.

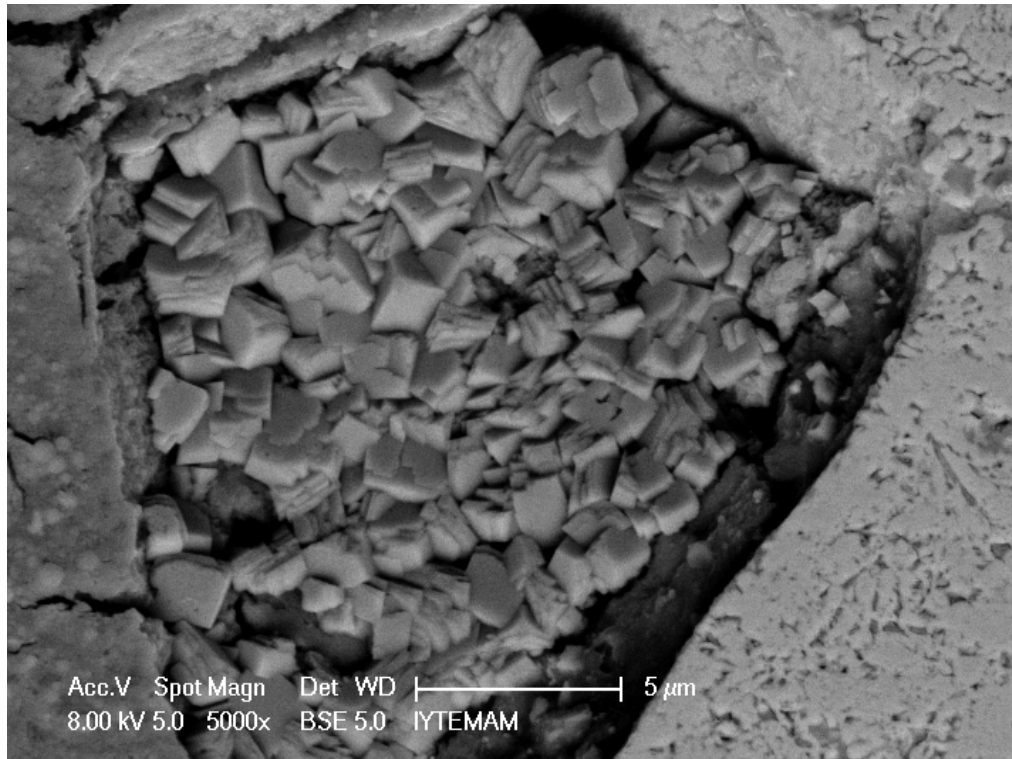
Şekil 8.34 ve Şekil 8.35'te sırasıyla 500 ve 2000 kat büyütme oranında KRPC karışımının parlak kesit görüntüleri verilmiştir. Açık renkli faz alüminyum ve demirce zengin bileşenleri (C-A-H) gösterirken, koyu renkli taneler kuvars agregalarını, ara faz ise hidrate olmuş matrisi göstermektedir. Matris fazındaki çukurcuklarda kübik kristallerden oluşan yığınlar mevcuttur. Bu kristaller Şekil 8.36'da daha ayrıntılı görülmektedir. Matris fazı, çok sayıda uzun olmayan kılcal çatlak içermektedir. Bu çatlakların karışımın yüksek dozajda bağlayıcı içermesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 8.34 KRPC karışımı SEM (BSE) görüntüsü - 500x.

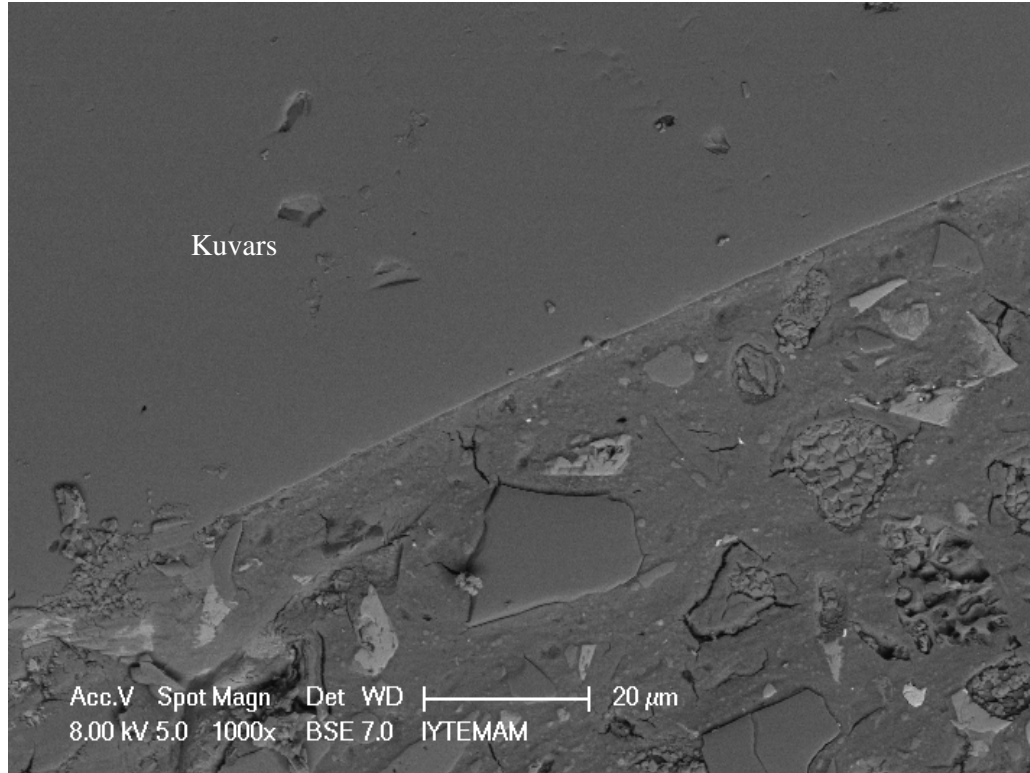


Şekil 8.35 KRPC karışımı SEM (BSE) görüntüsü - 2000x.

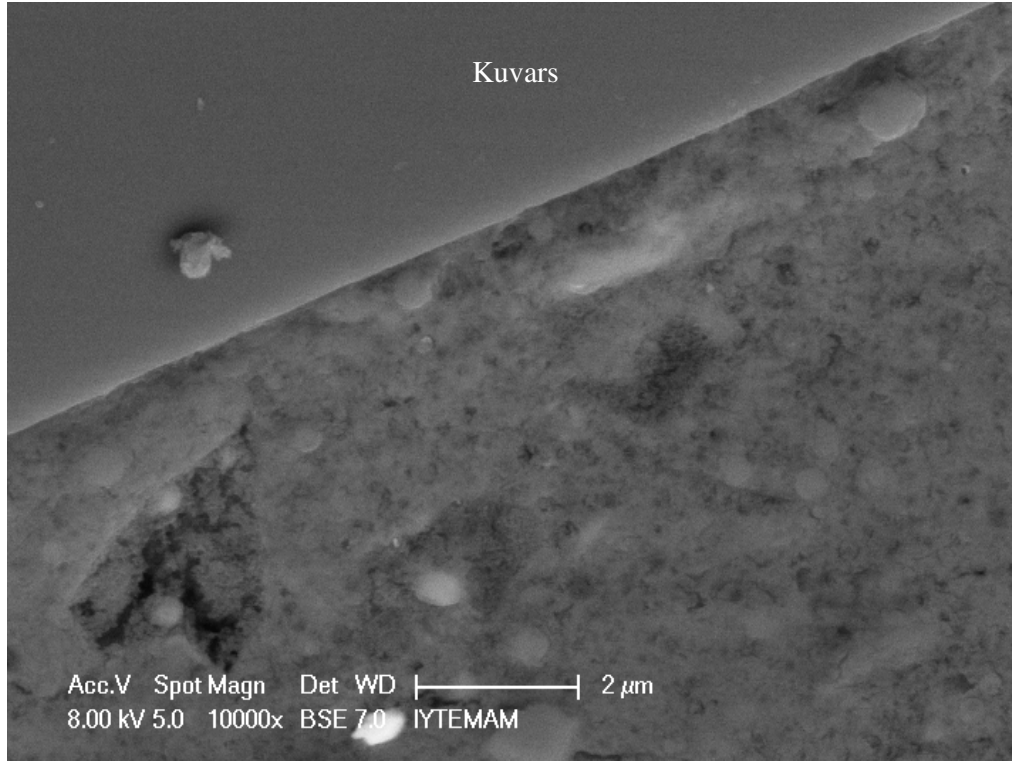


Şekil 8.36 KRPC karışımı SEM (BSE) görüntüsü-kübik kristaller.

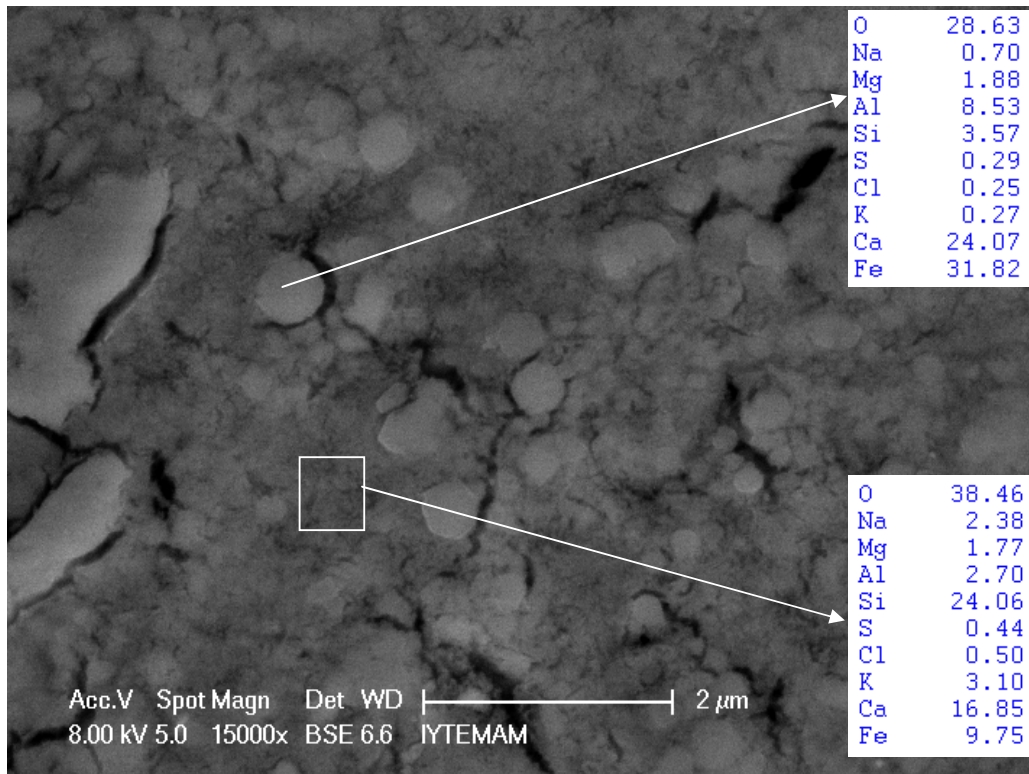
Agrega - matris ara yüzeyinin oldukça güçlü olduğu görülmektedir (Şekil 8.37 ve Şekil 8.38). Matris fazının yüksek büyütme oranlarındaki görüntüsü Şekil 8.39'da verilmiştir. Açık renkli kısımların, kalsiyum, demir ve alüminyum bakımından zengin olduğu, daha koyu renkli bölgelerin ise, kalsiyum ve silisyum bakımından zengin olduğu görülmektedir.



Şekil 8.37 KRPC karışımı agrega - matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü - 1000x.



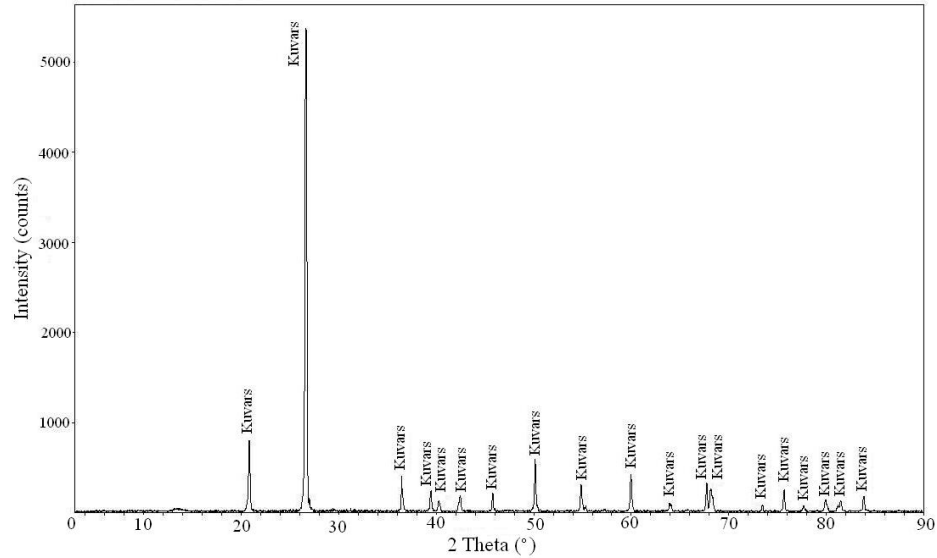
Şekil 8.38 KRPC karışımı agrega - matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü - 10000x.



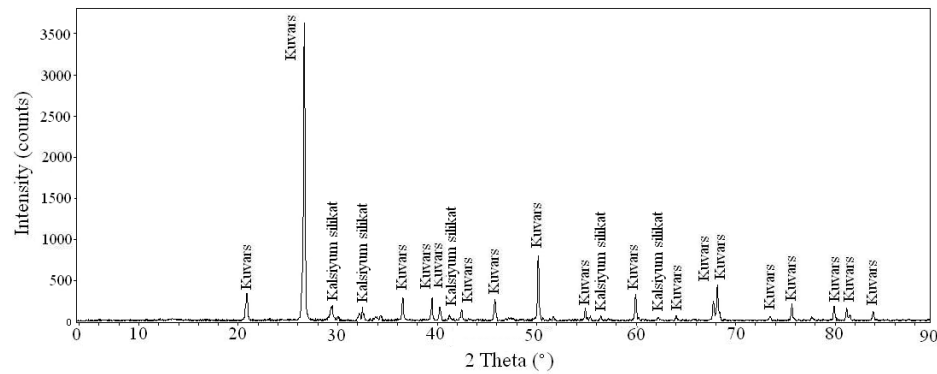
Şekil 8.39 KRPC karışımı matris SEM (BSE) görüntüsü - 15000x.

### 8.6.3 XRD İncelemeleri

Şekil 8.40 ve 8.41’de buhar kürü geçirmiş ARPC ve KRPC karışımlarının XRD analizleri verilmiştir. Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilmiş olan ARPC karışımı kuvars dışında herhangi bir pik vermemiştir. Kuvars bu karışımda kullanılan agregadan kaynaklanmaktadır. AAH üzerinde daha önce yapılan ve Bölüm 6.6’da verilen XRD analizleri de, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen harçların amorf olduğunu göstermişti. KRPC karışımı üzerinde yapılan XRD analizi ise, agregadan gelen kuvarların yanı sıra, kalsiyum silikat ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) pikleri de vermiştir. Kalsiyum silikat yapı, C-S-H yapının susuz halidir.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve  $\text{CaCO}_3$  bileşiklerine ise rastlanılmamıştır.



Şekil 8.40 ARPC karışımı XRD analizi.



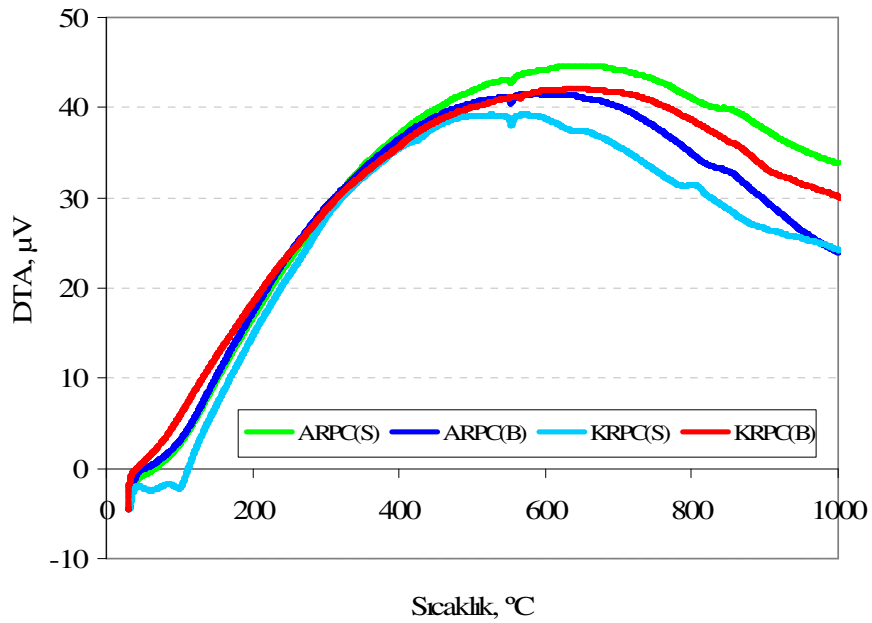
Şekil 8.41 KRPC karışımı XRD analizi.

#### 8.6.4 DTA-TGA-DTG İncelemeleri

DTA (Diferansiyel termal analiz) malzeme içerisindeki farklı fazların ısı etkisiyle ayrışmasının gerçekleştiği bölgeleri, TGA (Termogravimetrik analiz) ise eş zamanlı olarak ısı etkisiyle oluşan ayrışmadan kaynaklanan ağırlık kayıplarını göstermektedir. TGA deneyinin çözünürlüğü bazı durumlarda ağırlıkta oluşan değişim piklerinin ortaya çıkmasında yetersiz kalmaktadır. Bu piklerin yakalanmasında DTG (Derivative Termogravimetrik analiz) daha uygun olmaktadır (Klimesch ve Ray, 1997).

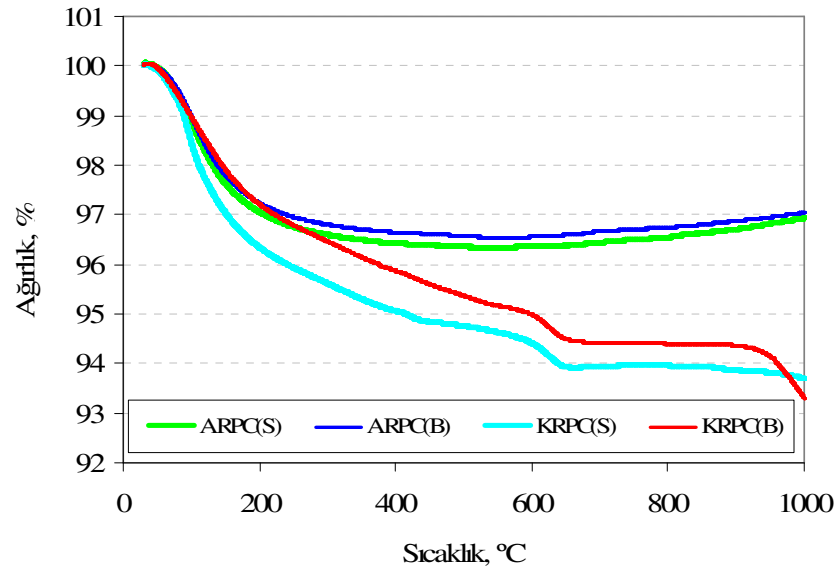
Bu tez kapsamında elde edilen sonuçların değerlendirmesine geçmeden önce literatürde verilen bileşen ayrışma sıcaklıklarından söz etmekte fayda vardır.  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in ayrışması 440 ile 520 °C arasında,  $\text{CaCO}_3$ 'ün ayrışması ise 600-780 °C arasında meydana gelmektedir. Ayrıca, kimyasal bağ suyu veya çimentonun reaksiyonu için gerekli su miktarının 140 ile 1100 °C arasındaki ağırlık kaybına denk geldiği bildirilmiştir (Pane ve Hansen, 2005). Barbhuiya, Gbagbo, Russell ve Basheer (2009), 100 ile 150 °C civarındaki ağırlık kaybının C-S-H jeline bağlı suyun kaybına, 400 ile 520 °C arasındaki ağırlık kaybının ise  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in ayrışmasına karşılık geldiğini bildirmiştir. Cheyrezy, Maret ve Frouin (1995), RPC üzerinde yaptığı analizlerde 420 ile 500 °C arasındaki pik varlığını  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in ayrışması olarak, 750-850 °C arasındaki pik varlığını ise kalsitin dekarbonatlaşması olarak bildirmiştir. Wang ve Scrivener (1995), AA-YFC hamurları üzerinde yaptığı deneylerde 330 ile 400 °C arasındaki DTA pikinin varlığını hidrotalsit tipi fazlara bağlamıştır. Klimesch ve Ray (1997), DTA eğrisinde ~200 °C civarındaki endotermik piki C-S-H'nin dehidratasyonuna bağlamıştır. Yaklaşık 800 °C civarındaki kütle kaybı ise iyi kristalize olmuş kalsite bağlanmıştır. Ebert ve Mörtel (1956) dehidratasyon reaksiyonları nedeniyle C-S-H (I) için kütle kaybının ~ 200-250 ve ~ 800 °C'de meydana geldiğini, 11 Å tobermoritin dehidratasyonunun ise ~ 120, ~ 300-400 ve ~ 500-600 °C'de gözlemlendiğini bildirmiştir. Rojas (2006) TGA eğrisinde 160 °C'ye kadar uzanan geniş bir bandın C-S-H, 230–330 °C aralığına yerleşmiş endotermik pikin hidrogarnet, 635–733 °C aralığındaki pikin ise kalsiyum karbonat varlığına işaret ettiğini bildirmiştir.

Şekil 8.42’de ARPC ve KRPC karışımlarının standart su kürü (S) ve buhar kürü (B) durumunda DTA eğrileri verilmiştir. DTA grafiğinde 560-575 °C arasındaki endotermik pik karışımlarda kullanılan kuvars agregasının yapısında bu sıcaklıklarda meydana gelen  $\alpha$  kuvars  $\beta$  kuvars dönüşümüyle ilgilidir. Sıcaklık 800 °C’nin üzerine çıktığında oluşan düzlük veya eğim değişimi kalsitli bileşenlerin varlığı ile ilgili olabilir. ARPC karışımında bu sıcaklıklarda görülen pik ise Ebert ve Mörtel (1956) tarafından belirtildiği gibi, C-S-H (I)’in dehidratasyonundan kaynaklanıyor olabilir. Şekil 8.43’te aynı karışımların TGA eğrileri verilmiştir. ARPC karışımında belirli bir sıcaklıkta ani bir ağırlık kaybı gözükmemiştir. Aksine 600 °C sıcaklıktan sonra ağırlıkta artış oluşmaya başlamıştır. Bu durum, deney nitrojen ortamında yapılmış olsa da, tam izole bir sistem olmaması nedeniyle hidratların oksitlenmesine bağlanmıştır. KRPC karışımında 600-650 °C arasında oluşan ağırlık kaybı, Ebert ve Mörtel (1956) tarafından belirtildiği gibi, tobermoritin dehidratasyonundan kaynaklanıyor olabilir.



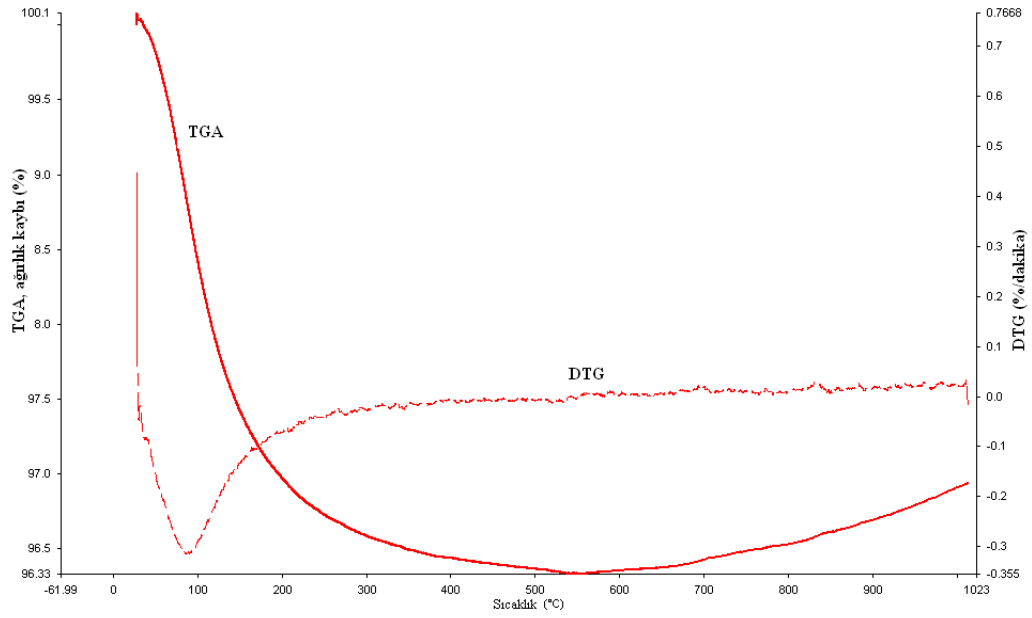
Şekil 8.42 ARPC ve KRPC karışımlarının DTA grafikleri.



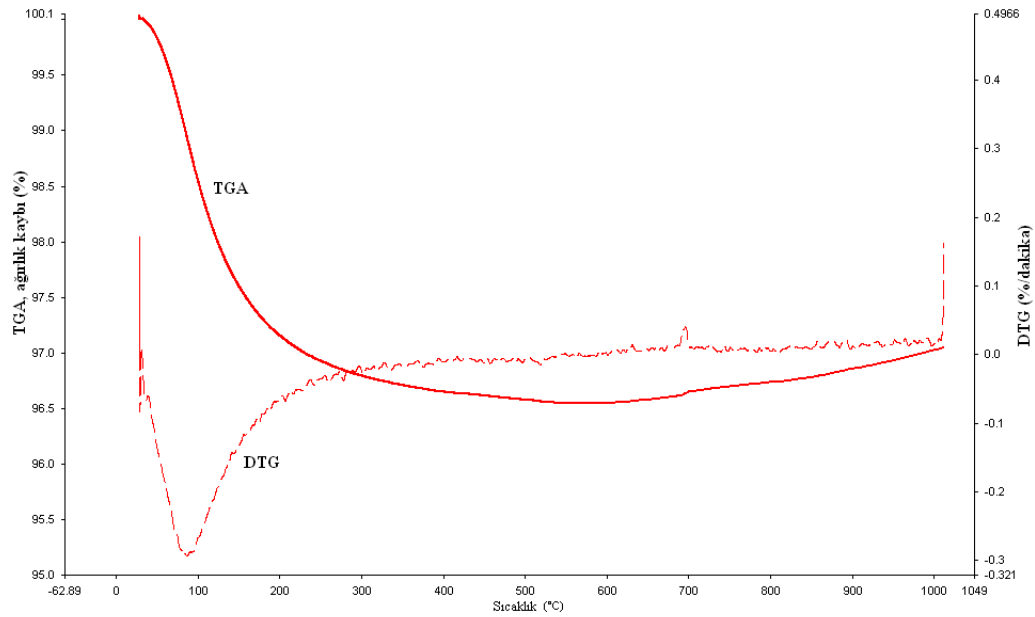


Şekil 8.43 ARPC ve KRPC karışımlarının TGA grafikleri.

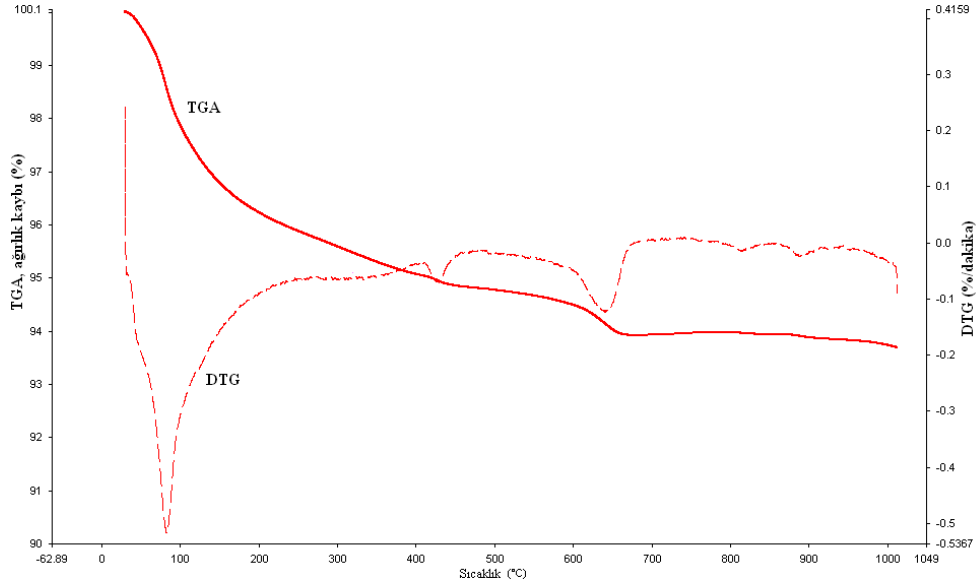
Karışımların TGA-DTG analizleri Şekil 8.44-47 arasında verilmiştir. DTG eğrilerinde görülen ilk pike kadarki (100 °C civarında) ağırlık kaybı hidratlara kimyasal olarak bağlanmayan serbest suyun kaybindan kaynaklanmaktadır. Bu pikten sonraki su kaybı ise, yapısal suyun kaybindan (C-S-H ve Ca(OH)<sub>2</sub>'in dehidratasyonu) kaynaklanmaktadır. ARPC karışımlarında 700 °C civarında oluşan ekzotermik pik, daha önce de belirtildiği gibi, 600 °C'den sonra oluşan ağırlık artışının bir sonucudur. KRPC karışımlarında 420 °C civarında görülen pik Ca(OH)<sub>2</sub>'in ayrışmasından kaynaklanmaktadır. Yaklaşık olarak 640 °C civarında görülen pik tobermoritin dehidratasyonundan kaynaklanıyor olabilir. Sıcaklık 800-900 °C olduğunda görülen pikler ise kalsitin dekarbonasyonundan kaynaklanmaktadır.



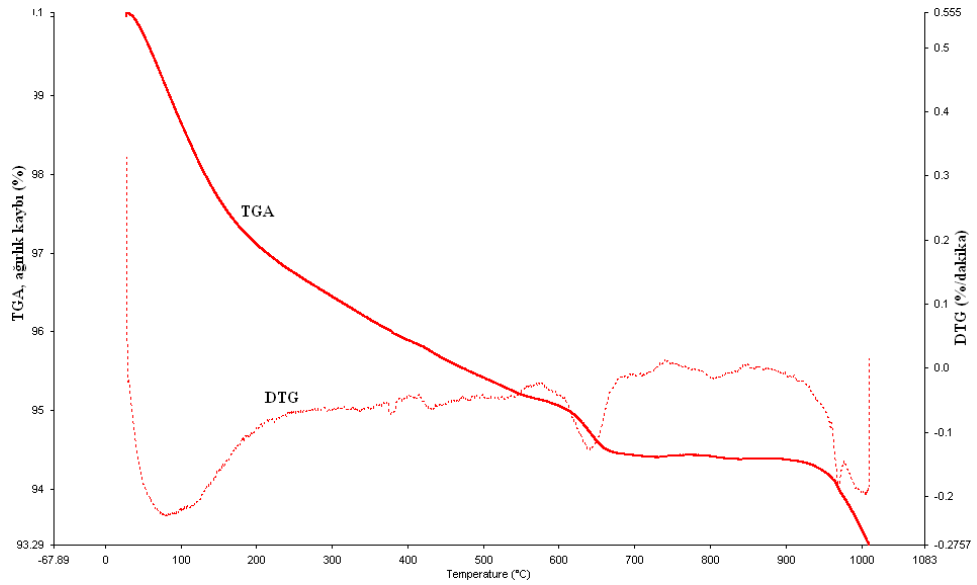
Şekil 8.44 Standart su kücü geçirmiş ARPC karışımının TGA-DTG grafiği.



Şekil 8.45 Buhar kücü geçirmiş ARPC karışımının TGA-DTG grafiği.



Şekil 8.46 Standart su kürü geçirmiş KRPC karışımının TGA-DTG grafiği.

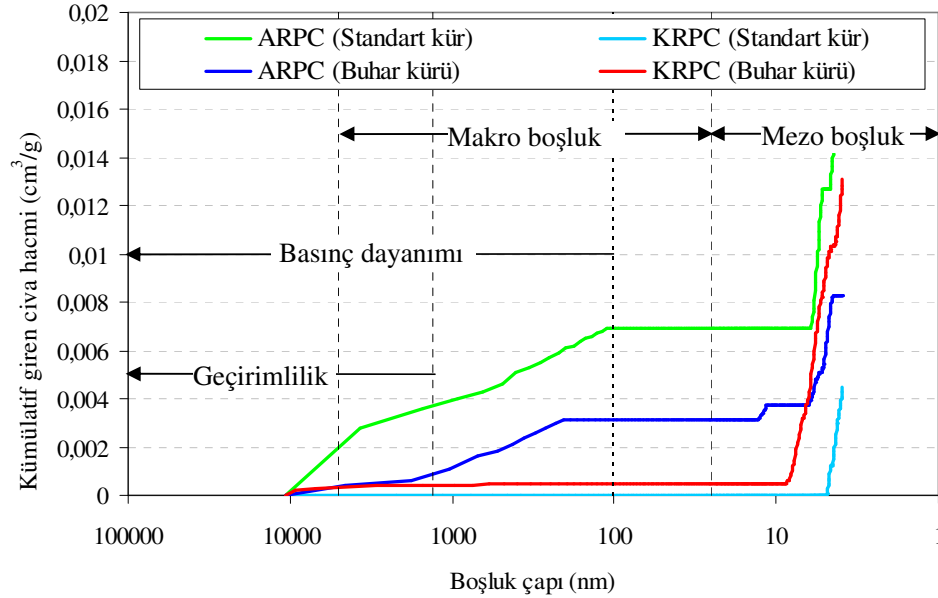


Şekil 8.47 Buhar kürü geçirmiş KRPC karışımının TGA-DTG grafiği.

### 8.6.5 Boşluk Boyutu Dağılımı İncelemeleri

Şekil 8.48’de ise boşluk boyutu dağılımının karışıma ve kür yöntemine bağlı olarak değişimi verilmiştir. ARPC karışımının her iki kür durumunda da KRPC karışımına kıyasla daha kaba bir boşluk boyut dağılımına sahip olduğu görülmüştür. Buhar kürü uygulaması ARPC karışımında poroziteyi azaltmıştır. Bununla birlikte,

KRPC karışımına buhar kürü uygulandığı takdirde boşluk boyut dağılımı bir miktar irileşmiş ve porozite artmıştır.



Şekil 8.48 ARPC ve KRPC karışımları için kür durumuna bağlı olarak boşluk boyut dağılımı.

### 8.7 III. Aşama Deneylelerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Geliştirilen ARPC karışımı ve klasik RPC (KRPC) karışımı üzerinde gerçekleştirilen deneylelerden elde edilen sonuçlar ana hatlarıyla aşağıda özetlenmiştir:

Her iki karışımında işlenebilirlik, priz süresi ve kuruma büzülmesi deformasyonları bakımından pratikte uygulanabilir karışımlar olduğu görülmüştür.

Reolojik ölçümler, ARPC karışımının KRPC karışımına kıyasla, eşik kayma gerilmesinin ve viskozitesinin daha yüksek olduğunu, bir başka deyiş ile KRPC'nin ARPC'ye kıyasla daha işlenebilir olduğunu göstermiştir. Genel bir değerlendirme yapılacak olursa, geliştirilen karışımların oldukça viskoz ama sıkışabilme derecesi de yüksek karışımlar olduğu söylenebilir.

ARPC ve KRPC karışımlarının basınç ve silindir yarma dayanımlarının benzer olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, ARPC karışımının eğilme dayanımı, kırılma

enerjisi ve tokluğu KRPC karışımına kıyasla daha yüksekken, elastisite modülü daha düşüktür. Poisson oranları ise her iki karışım için de benzerdir.

SEM incelemeleri, her iki karışım için de agrega-matris ara yüzeylerinin kuvvetli olduğunu göstermiştir. ARPC karışımının matrisinin nanometre boyutundaki çok sayıda boşluktan oluştuğu ve Ca/Si oranının KRPC'ye kıyasla daha düşük olduğu, bir başka deyiş ile matrisin bağlayıcılık özelliğinin daha kuvvetli olduğu görülmüştür.

Termik analizler, ARPC karışımında C-S-H (I), KRPC karışımında ise tobermorit,  $\text{Ca(OH)}_2$  ve kalsit varlığına işaret etmiştir. Bununla birlikte, XRD analizlerinde bu bileşenlere rastlanılmamıştır. Sadece, KRPC karışımında kalsiyum silikat yapı tespit edilmiştir.

Cıva porozimetresi ölçümleri, ARPC'nin KRPC'ye kıyasla daha kaba bir boşluk boyutu dağılımına sahip olduğunu göstermiştir. ARPC'de buhar küre uygulaması ile boşluk boyut dağılımı daha ince bir hal alırken, KRPC'de daha kaba bir hal almıştır.

## **BÖLÜM DOKUZ**

### **GELİŞTİRİLEN KARIŞIMIN DAYANIKLILIK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

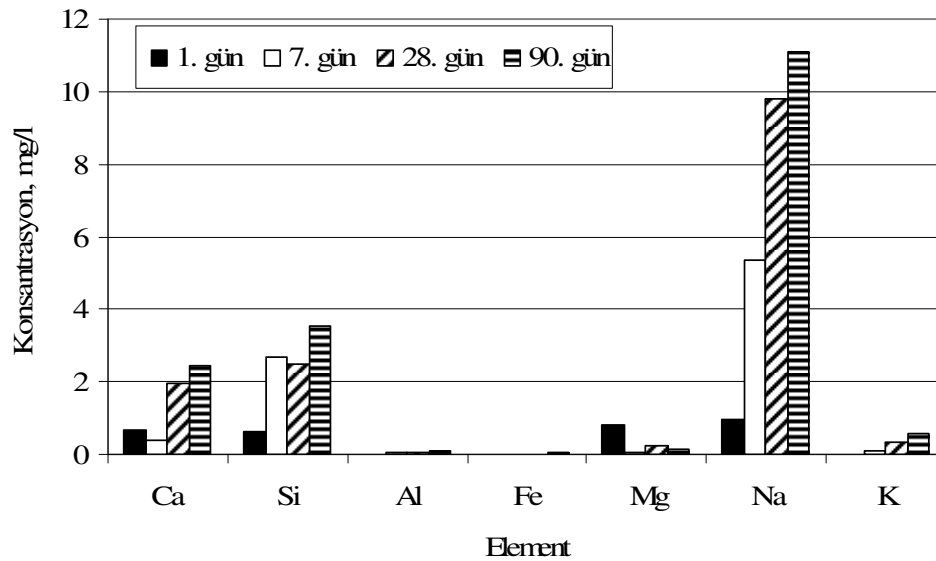
Önceki bölümde, ARPC karışımının taze hal, mekanik, boyutsal kararlılık özellikleri ve içyapıları KRPC karışımı ile karşılaştırmalı olarak sunulmuş idi. Farklı içyapı özellikleri olan bu iki karışım, üstün mekanik özelliklere ve boyutsal kararlılığa sahip olduğu görülmüştür. Bu bölümde, ARPC ve KRPC karışımının çeşitli dış etkilere karşı dayanıklılığı karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bazı dayanıklılık deneyleri, buhar kürü geçirmiş numunelerin yanı sıra, karşılaştırma amacıyla standart kür geçirmiş numuneler veya lifsiz numuneler üzerinde de yapılmıştır. İncelenen etkiler aşağıda özetlenmiştir:

- çözünme (leaching),
- kapiler su emme, toplam su emme ve geçirimli boşluk miktarı,
- çiçeklenme,
- alkali-silika reaksiyonu potansiyeli,
- sülfat etkilerine dayanıklılık,
- sülfürik asit etkisine dayanıklılık,
- hızlı klorür iyon geçirimliliği,
- çelik donatı korozyonu,
- karbonatlaşma,
- aşınma dayanıklılığı,
- darbe etkilerine dayanıklılık,
- yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklılık,
- donma-çözülme dayanıklılığı.

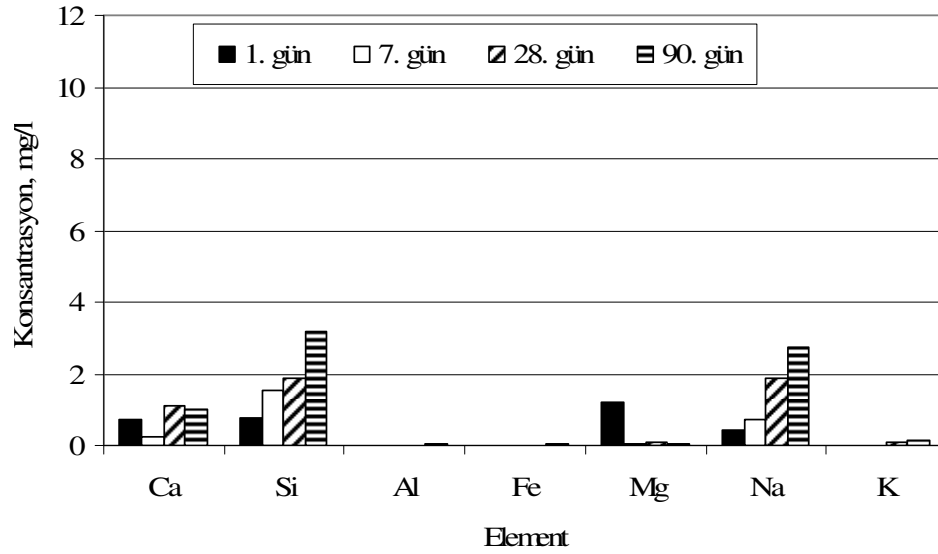
Bu dış etkilere karşı malzemelerin dayanıklılığı incelenirken genellikle, mekanik özelliklerdeki değişim, boyutsal stabilite ve gerektiğinde SEM incelemelerine gidilmiştir. Mekanik özelliklerdeki değişim, aynı yaştaki buhar kürü sonrası su içerisinde bekletilen şahit örnekler referans alınarak belirlenmiştir. SEM incelemeleri, numune yüzeyinden yaklaşık 500 µm ötedeki bölgede yapılmıştır.

## 9.1 Çözünme

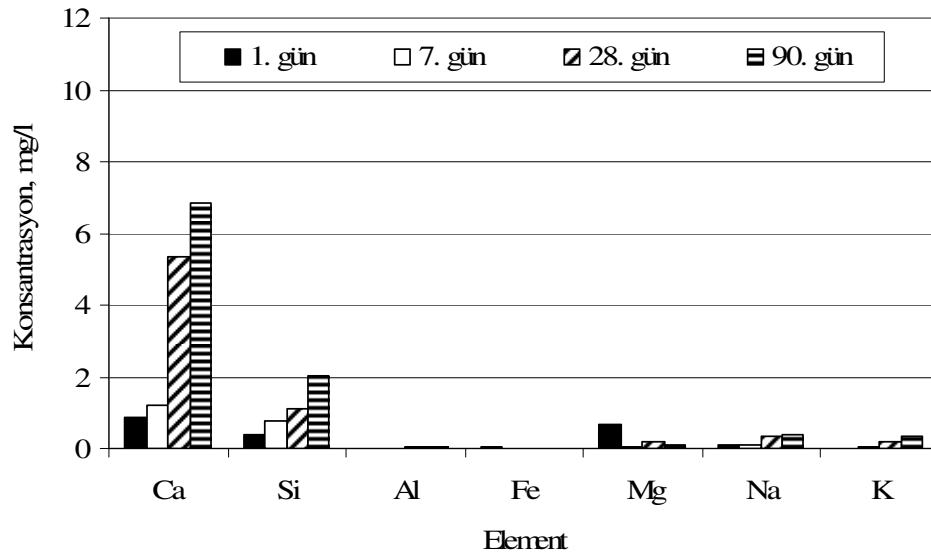
Ayrıntıları 5.2.13.1 bölümünde verilen çözünme deneyi, lifli ARPC ve KRPC karışımları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 9.1'den görüldüğü gibi, standart kür durumunda ARPC karışımından suya salıverilen baskın iyonlar sodyum, silisyum ve kalsiyumdur. Sodyum kullanılan aktivatörden, kalsiyum yüksek fırın cürufundan, silisyum ise aktivatör ve yüksek fırın cürufundan gelmektedir. Buhar kürü uygulanması halinde suya salıverilen iyon miktarlarında özellikle de sodyum iyonu miktarında önemli derecede azalma ortaya çıkmıştır (Şekil 9.2). Bu durum, buhar kürü uygulanması ile alkali aktivasyon reaksiyonlarının önemli derecede tamamlandığını göstermektedir. KRPC karışımında ise (Şekil 9.3), suya salıverilen ana öğelerin kalsiyum ve silisyum olduğu görülmektedir. Kalsiyum, çimentonun hidratasyon reaksiyonlarından olan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'ten kaynaklanmaktadır. Buhar kürü uygulanmış ARPC karışımından suya en fazla miktarda salıverilen iyon olan sodyum ve silisyum miktarının, KRPC karışımından suya en fazla miktarda salıverilen iyon olan kalsiyumdan daha düşük olması da, buhar kürü uygulanması halinde ARPC'deki yüksek fırın cürufu ile alkaliler arasındaki reaksiyon derecesinin yüksek olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 9.1 Standart kür geçirmiş ARPC karışımından suya salıverilen iyon konsantrasyonu.



Şekil 9.2 Buhar kürü geçirmiş ARPC karışımından suya salıverilen iyon konsantrasyonu.



Şekil 9.3 Buhar kürü geçirmiş KRPC karışımından suya salıverilen iyon konsantrasyonu.

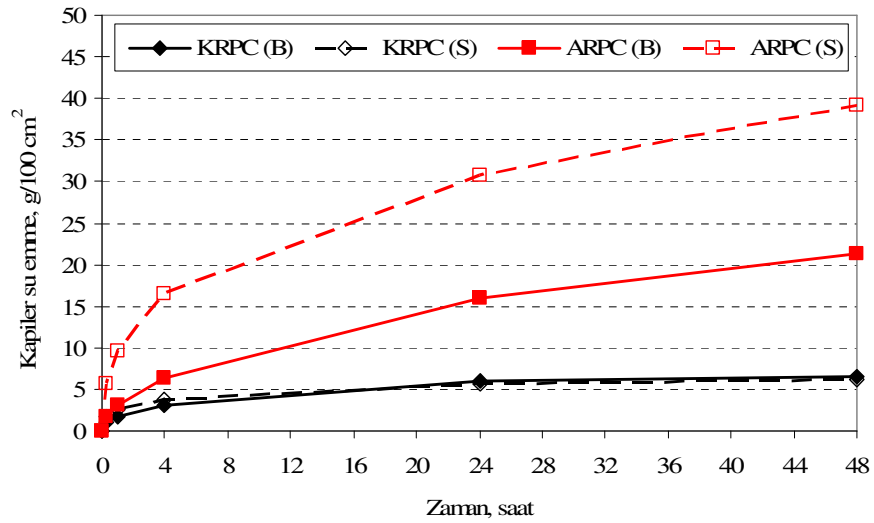
Standart kür geçirmiş ARPC karışımının içinde bulunduğu saf suyun pH değerinin doksanıncı günde 7,65, buhar kürü geçirmiş ARPC karışımının 7,30 ve buhar kürü geçirmiş KRPC karışımının ise 7,51 olduğu görülmüştür. Deneyde kullanılan deionize suyun başlangıç pH değeri ise 5,89'dur. ARPC karışımının pH değerinin buhar kürü durumunda standart küre kıyasla daha az artması, numuneden suya iyon geçişinin azaldığını gösteren diğer bir bulgudur.



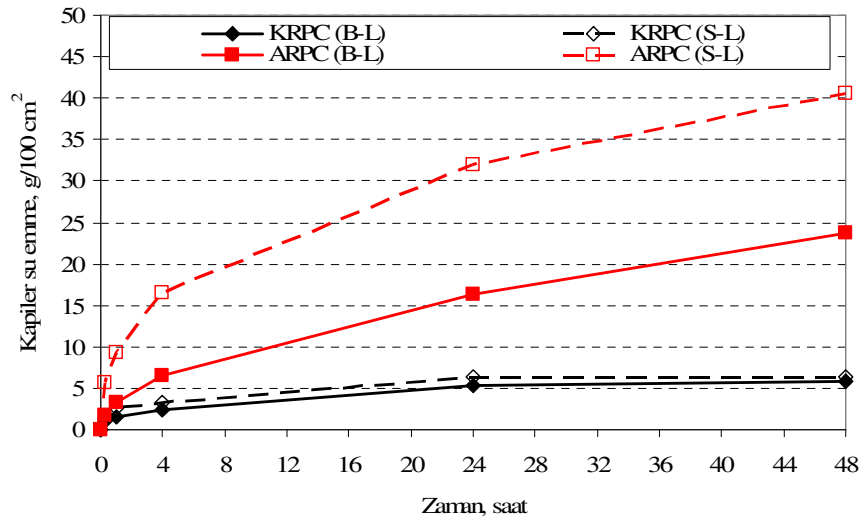
## 9.2 Kapiler Su Emme, Toplam Su Emme ve Geçirimli Boşluk Miktarları

Karışımların kapiler su emme miktarı, toplam su emme miktarı ve geçirimli boşluk miktarı Bölüm 5.2.7’de ayrıntıları verilen yöntemle belirlenmiştir.

Kapiler su emme miktarlarının değişimi, lifsiz ve lifli (L) durum için sırasıyla Şekil 9.4 ve 9.5’te verilmiştir. Kapiler su emme miktarlarının oldukça düşük mertebelerde olduğu görülmektedir. Kapiler su emme miktarları lifli durumda lif-matris ara yüzeyinin varlığından ötürü lifsiz duruma göre bir miktar daha yüksektir. KRPC karışımında standart kür (S) ve buhar kürü (B) durumunda kapiler su emme miktarının birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, ARPC karışımının kapiler su emme miktarı standart kür durumunda buhar kürü durumuna kıyasla daha yüksektir. Bu durum ARPC karışımında, toplam porozitenin ve özellikle de geçirimliliği etkileyen boşlukların (>1300 nm) miktarının buhar kürü uygulanması ile azalmasından kaynaklanmaktadır (bk. Bölüm 8.6.5). ARPC ve KRPC karışımları karşılaştırıldığında, buhar kürü durumunda ARPC karışımının KRPC karışımından 3 kattan daha fazla, standart kür durumunda ise 6 kattan daha fazla kapiler yolla su emdiği görülmektedir. Ayrıca, 24 ile 48 saat arasında KRPC karışımının kapiler yolla su emme grafiğinin yatay bir durum aldığı görülürken, ARPC karışımının 48 saatin üzerinde de kapiler yolla su emmeğe devam edeceği görülmektedir. Şekil 8.48’den görüleceği gibi, KRPC karışımı standart kürde 1300 nm’den daha büyük boşluk içermemektedir. Buhar küründe ise, 1300 nm’den büyük boşluklara giren cıva hacmi  $0,0004 \text{ cm}^3/\text{g}$  düzeyinde olup oldukça düşüktür. ARPC’de standart kürde  $00036 \text{ cm}^3/\text{g}$ , buhar küründe ise  $0009 \text{ cm}^3/\text{g}$  düzeyindedir. Bu sonuçlar, ARPC’nin daha yüksek miktarda kapiler su emmesinin nedenini açıklar niteliktedir.



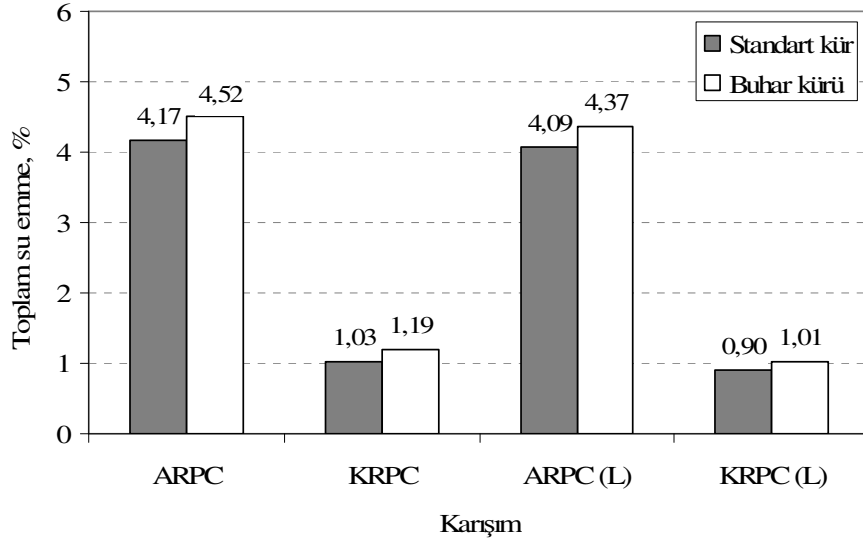
Şekil 9.4 Lifsiz ARPC ve KRPC karışımlarının zamana bağlı olarak kapiler su emme miktarının değişimi.



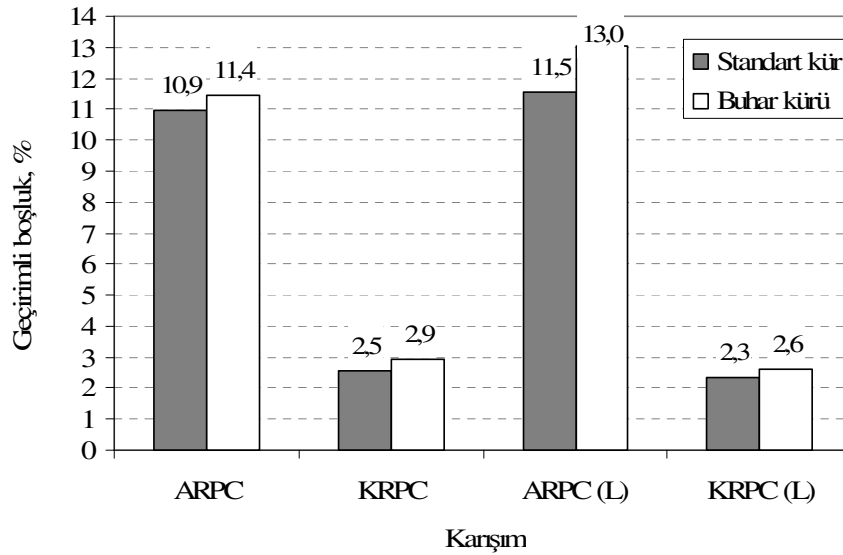
Şekil 9.5 Lifli ARPC ve KRPC karışımlarının zamana bağlı olarak kapiler su emme miktarının değişimi.

Şekil 9.6'da su emme içeriklerinin, Şekil 9.7'de ise geçirimli boşluk oranlarının değişimi verilmiştir. Buhar küre durumunda su emme miktarının ve geçirimli boşluk oranının standart küre kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu görülmüştür. ARPC'nin toplam su emme miktarı KRPC'den standart kür durumunda 4,5 kat, buhar küre durumunda ise 4,3 kat daha fazladır. Geçirimli boşluk oranları ise, her iki kür durumu için de 5 kat daha fazladır. ARPC'nin daha yüksek oranda su emmesi ve

daha yüksek miktarda geçirimli boşluk içermesi daha öncede açıklandığı gibi, boşluk boyut dağılımının bir sonucudur.



Şekil 9.6 ARPC ve KRPC karışımlarının toplam su emme miktarının kütür yöntemine bağlı olarak değişimi.



Şekil 9.7 ARPC ve KRPC karışımlarının geçirimli boşluk oranının kütür yöntemine bağlı olarak değişimi.

### 9.3 Çiçeklenme

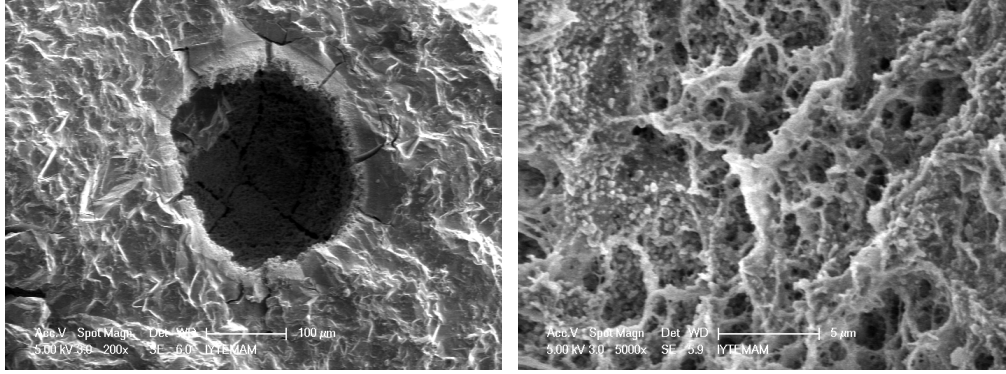
Alkalilerle aktivasyon yöntemiyle üretilen bağlayıcıların sorunlu yönlerinden birisi de, aktivasyonda kullanılan çözeltilerin aktivatör dozajının yüksek olması durumunda bu bağlayıcılarla üretilen betonlarda görülen önemli derecede çiçeklenme eğilimidir.

Çiçeklenme deneyi, ayrıntıları Bölüm 5.2.13.2’de verilen yöneme göre yapılmıştır. Standart ve buhar kürü geçirmiş lifsiz ve lifli ARPC ve KRPC karışımları üzerinde, 6 ay süreyle yapılan çiçeklenme deneyinde hiçbir karışımda görsel olarak çiçeklenme oluşumuna rastlanılmamıştır. Çiçeklenme oluşumu, kapiler boşlukların varlığına ve boşluk suyu çözeltisinin kompozisyonuna bağlıdır. Kapilerite deneyleri (Bölüm 9.2), ARPC karışımının kapiler yolla emdiği su miktarının KRPC karışımına kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir. Ancak, ARPC karışımının kapiler yolla emdiği su miktarı 6. bölümde özellikleri verilen alkalilerle aktivasyon yöntemiyle üretilen diğer harçlara kıyasla oldukça düşüktür. Ayrıca, ARPC’nin kapiler yolla emdiği su miktarı, Bölüm 6.5’ten de görüleceği üzere bağlayıcısı çimento olan harçlardan da daha düşük düzeydedir. Suyu salıverilen serbest haldeki veya çözünen iyon miktarlarının belirlendiği çözünme deneyi sonuçları (Bölüm 9.1) ise, ARPC karışımından suya salıverilen iyon miktarının, özellikle buhar kürü durumunda, oldukça düşük miktarda olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, ARPC’nin bağlayıcı fazının gelişen özellikleri (boşluk yapısı ve alkalilerin büyük oranda bağlı olması) çiçeklenme oluşumunun önüne geçmiştir.

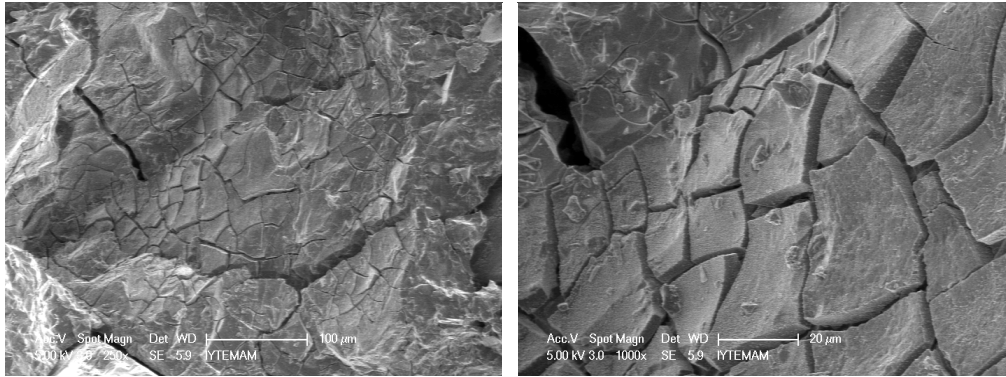
### 9.4 Alkali Silika Reaksiyonu (ASR)

ARPC ve KRPC karışımlarında agrega olarak ASR bakımından reaktif olmayan kuvars agregası kullanılmıştır. Bununla birlikte, alkali aktivasyon yöntemi ile üretilen ARPC karışımı yapısında yüksek derecede alkali içermesi nedeniyle, bu karışımların ASR potansiyeli incelenmeye değer bir durabilite problemidir.

Deneyleer ayrıntıları Bölüm 5.2.13.2’de verilen yöntemle, kuvars agregalı RPC karışımlarının yanında, ASR bakımından reaktif olduğu bilinen Gediz kumu ile de gerçekleştirilmiştir. Harç çubuklarının boy değişimi 3 ay süreyle izlenmiştir. ARPC ve KRPC karışımlarının gerek buhar kürü, gerekse standart kür durumunda genişlemedikleri aksine bir miktar büzöldükleri görülmüştür. Bu durum karışımların geçirimsizliğinin, özellikle KRPC, oldukça düşük olmasının yanı sıra, ARPC karışımında kullanılan alkalilerin serbest olmamasına ve  $\text{Ca(OH)}_2$  içermemesine bağlanmıştır. SEM incelemeleri 3 ay süreyle çözeltiye maruz bırakılan numuneler üzerinde yapılmıştır. SEM incelemeleri, buhar kürü geçirmiş, kuvars ve reaktif silis agregalı ARPC karışımı ve reaktif silis agregalı KRPC karışımı üzerinde yapılmıştır. ARPC karışımında her iki agrega kullanımı durumunda da ASR belirtilerine rastlanmıştır. Şekil 9.8’de kuvars agregalı ARPC’de bir boşluk ve boşluğun iç kısmının yakından görünümü verilmiştir. Şekil 8.19 ile kıyaslandığında önemli farklılıkların olduğu göze çarpmaktadır. Boşluk içindeki çatlakların boşluğun kenarına kadar uzandığı görülmektedir. Boşluğun içindeki yapı üzerinde yapılan EDS analizi Na içeriğinin oldukça yüksek (Na:%12,42, Si:%22,88, Ca:6,92) olduğunu göstermiştir. ASR deneyine maruz kalmayan numunelerdeki boşlukların içinin boş olduğu ve Na içeriğinin düşük (%2,65) olduğu belirtilmelidir (Tablo 8.6). Şekil 9.9’da muhtemelen kuvars agregasının yerinden çıktığı bir bölgedeki (agregamatis ara yüzeyi) çatlaklı yapı görülmektedir. EDS analizi bu bölgedeki Na içeriğinin de oldukça yüksek (Na:%9,15, Si:%28,96, Ca:13,45) olduğunu göstermiştir. Reaktif agrega kullanılması durumunda da benzer çatlak oluşumları görülmüştür. Bununla birlikte, KRPC karışımında kullanılan çimentonun eşdeğer alkali miktarı %0,6 değerinden daha yüksek olmasına rağmen ASR belirtisine rastlanılmamıştır.

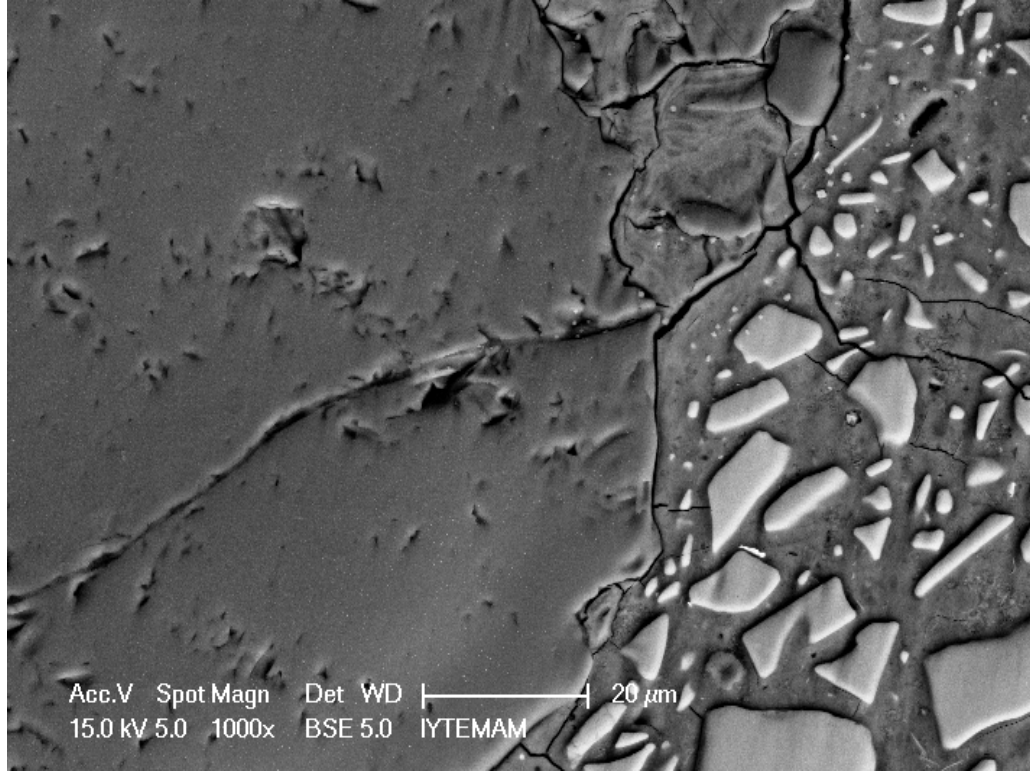


Şekil 9.8 1 M NaOH çözeltisine 3 ay süreyle maruz bırakılmış ARPC karışımı, boşluk (200x) ve boşluk içi (5000x) oluşumların SEM (SE) görüntüsü.



Şekil 9.9 1 M NaOH çözeltisine 3 ay süreyle maruz bırakılmış ARPC karışımı çatlak oluşumu SEM (SE) görüntüsü.

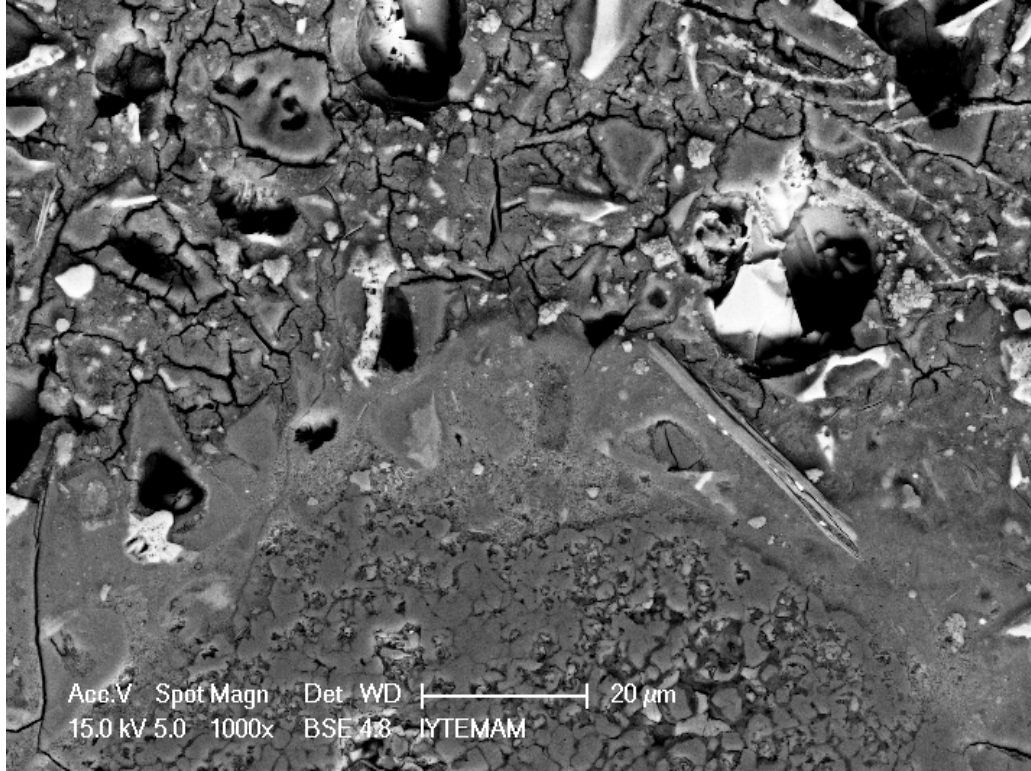
Şekil 9.10’da reaktif olduğu bilinen Gediz kumu ile üretilmiş ARPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.31 ile kıyaslandığında agrega-matris ara yüzeyinde ve matriste oluşan çatlaklar görülebilmektedir. Bununla birlikte, karakteristik ASR ürünlerine rastlanılmamıştır.



Şekil 9.10 1 M NaOH çözeltisine 3 ay süreyle maruz bırakılmış ARPC karışımı SEM (BSE) agrega-matris ara yüzeyi görüntüsü.

Şekil 9.11’de reaktif olduğu bilinen Gediz kumu ile üretilmiş KRPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü verilmiştir. Birkaç reaktif agrega kenarlarında yaklaşık 25  $\mu\text{m}$  genişliğinde bir reaksiyon halkasının varlığı tespit edilmiştir. Bu kısımda yapılan EDS analizi, Na içeriğinin %4,5 civarında olduğunu göstermiştir. Bu değer ASR deneyine maruz kalmamış KRPC karışımının matrisindekinden yaklaşık 2 kat fazla olup, bu halkanın ASR ürünü olduğunu göstermektedir.

SEM incelemeleri ile varlığı tespit edilen bu oluşumlara rağmen, ARPC ve KRPC karışımlarında ASR genişmesi oluşmaması, bu kompozitlerin bağlayıcı matrisinin yüksek dayanımının genişlemeye izin vermemesine ve büzülmenin genişmeden daha baskın olmasına bağlanabilir.



Şekil 9.11 1 M NaOH çözeltisine 3 ay süreyle maruz kalmış KRPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü.

## 9.5 Sülfat Etkilerine Dayanıklılık

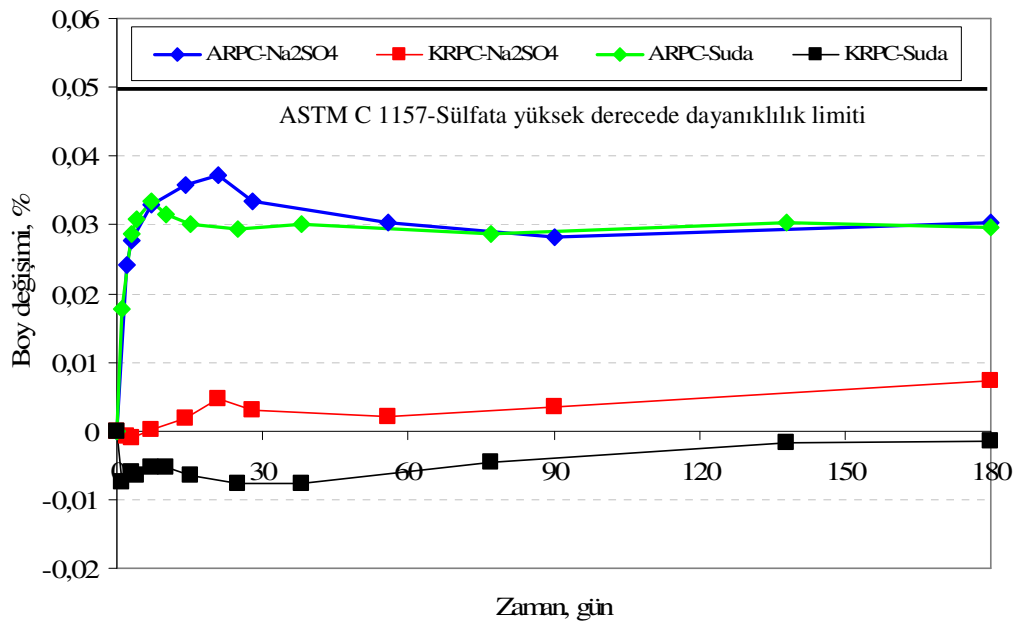
Karışımların sodyum ve magnezyum sülfat etkisine karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Uygulanan deney yönteminin ayrıntıları, Bölüm 5.2.13.3'te sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

### 9.5.1 Sodyum Sülfat Etkisine Dayanıklılık

Şekil 9.12'de %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının genleşme eğrileri verilmiştir. Ayrıca, sülfat etkisiyle oluşan genleşmelerin ayırt edilebilmesi için aynı koşullar altında su içerisinde bekletilen numunelerin de genleşme eğrileri verilmiştir. ARPC karışımında sodyum sülfat çözeltisinde oluşan genleşmeler neredeyse su içerisinde bekletilen ile aynı iken, su içerisinde bekletildiğinde büzülme gösteren KRPC karışımı sodyum sülfat çözeltisinde bir miktar genleşmiştir. Bu

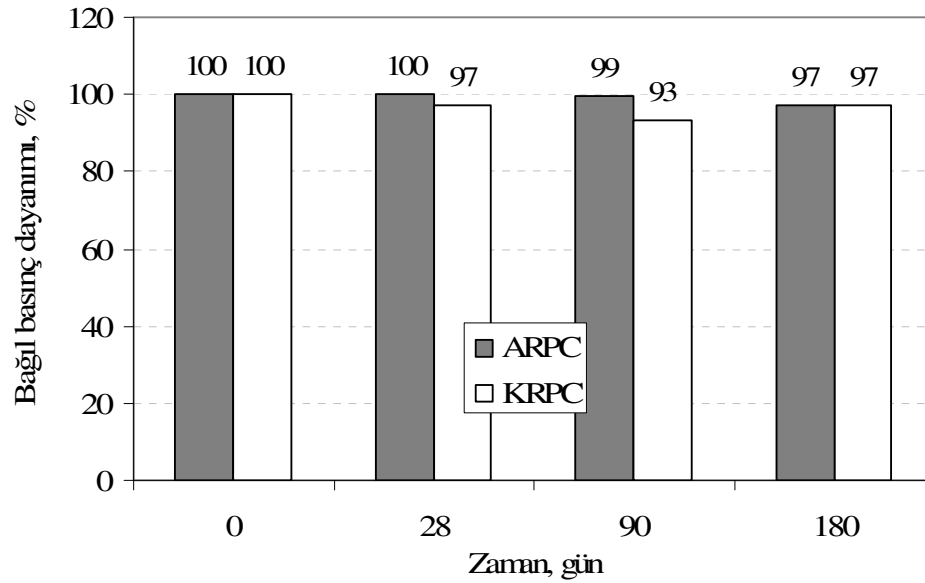


durum, ARPC karışımında sodyum sülfatın genleşme yaratmadığını göstermektedir. ASTM C 1157 “Standard Performance Specification for Hydraulic Cement” standardında 50 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde bekletilen numuneler için 6 aylık genleşme limiti, sülfata yüksek derecede dayanıklılık için %0,05, orta derecede dayanıklılık için %0,1 olarak verilmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi, bu çalışmada etkiyi daha kısa sürede ve daha şiddetli olarak görebilmek için 100 g/l sodyum sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Bu bağlamda, ARPC ve KRPC karışımlarının sodyum sülfat dayanıklılığının çok iyi olduğu söylenebilir.



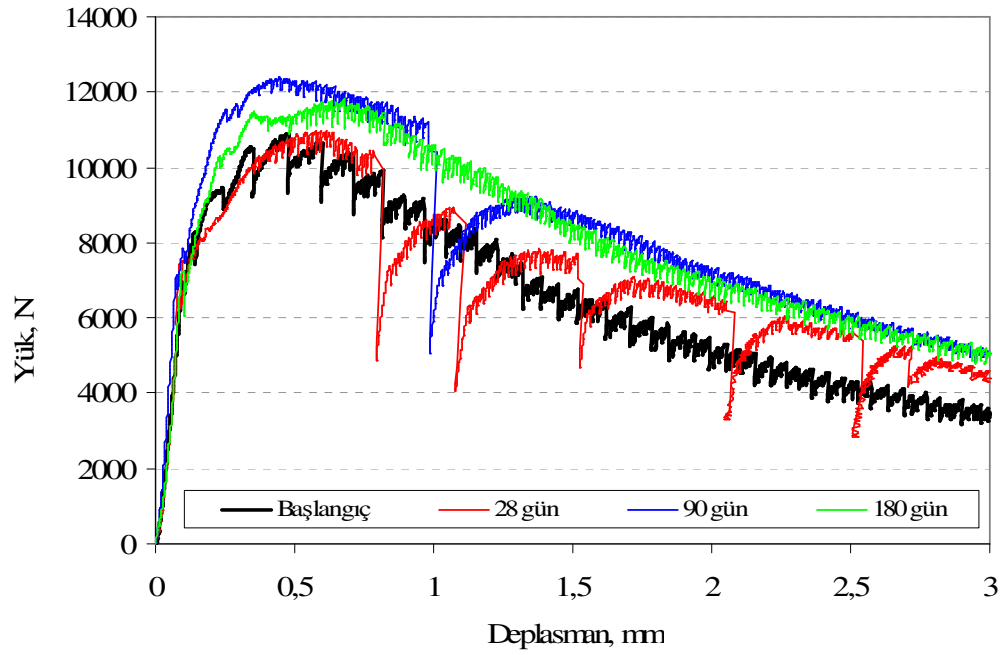
Şekil 9.12 %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının boy değişimi.

$\text{Na}_2\text{SO}_4$  etkisine 6 ay süreyle maruz kalma neticesinde ARPC ve KRPC karışımlarında görsel açıdan bir bozulma ortaya çıkmamıştır. Basınç dayanımındaki değişim incelendiğinde (Şekil 9.13) her iki karışımında dayanım kaybının ihmal edilecek düzeyde olduğu görülmektedir.

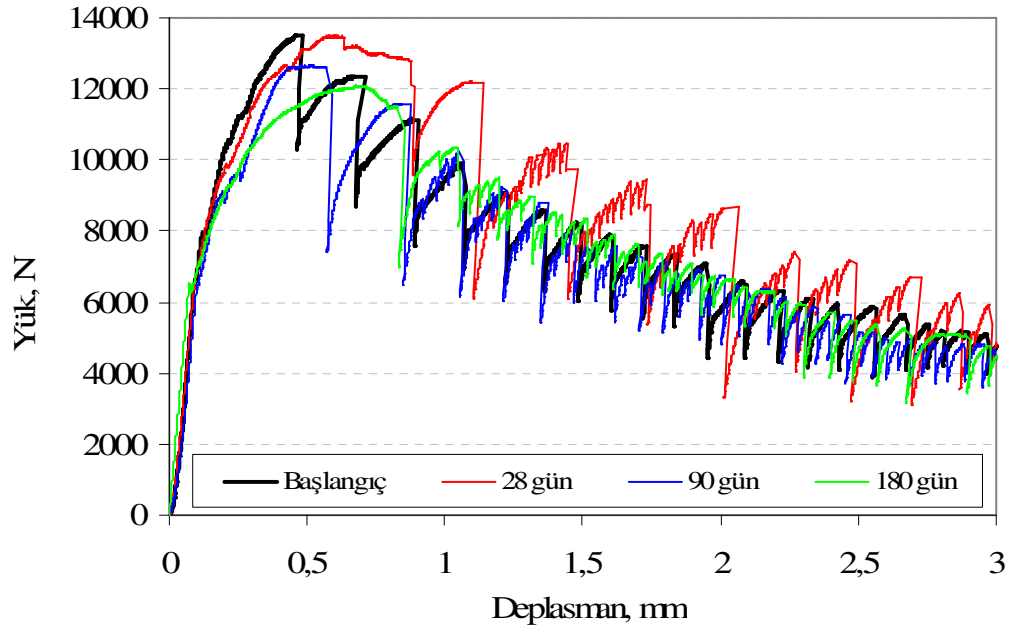


Şekil 9.13 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağıl basınç dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.

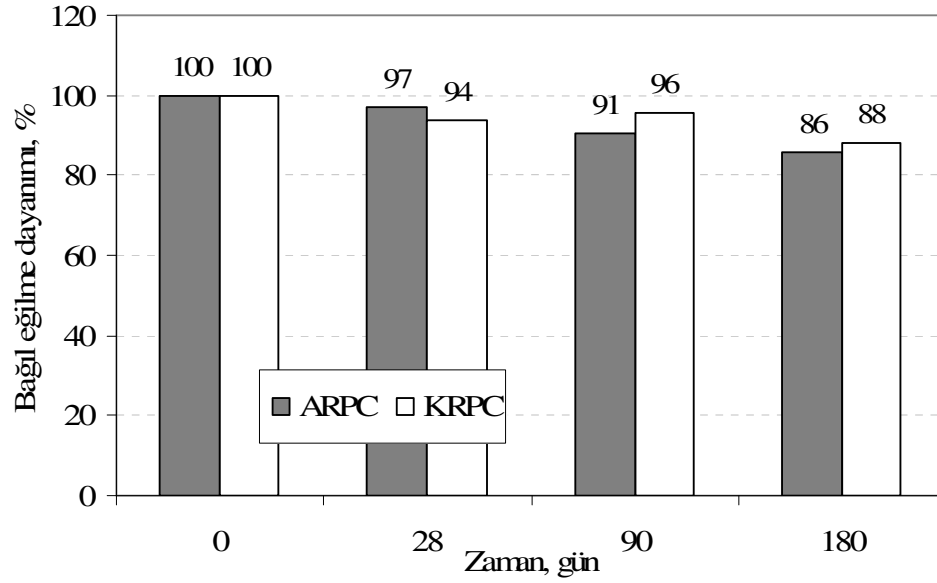
KRPC ve ARPC karışımları için zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri sırasıyla Şekil 9.14 ve Şekil 9.15'te verilmiştir. Çözeltiye maruz kalma sonunda özellikle, KRPC karışımında yük-deplasman eğrisinin alçalan kısmının eğiminin azaldığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak, eğilme dayanımındaki azalmaya karşın toklukta azalma yerine artışlar oluşmuştur (Şekil 9.16 ve 17). Sodyum sülfat etkisiyle en fazla mekanik dayanım kaybı eğilme dayanımında oluşmuştur. Daha öncede belirtildiği gibi, mekanik özelliklerdeki kayıplar belirlenirken aynı yaştaki su içerisinde bekletilen numunenin mekanik özellikleri esas alınmıştır.



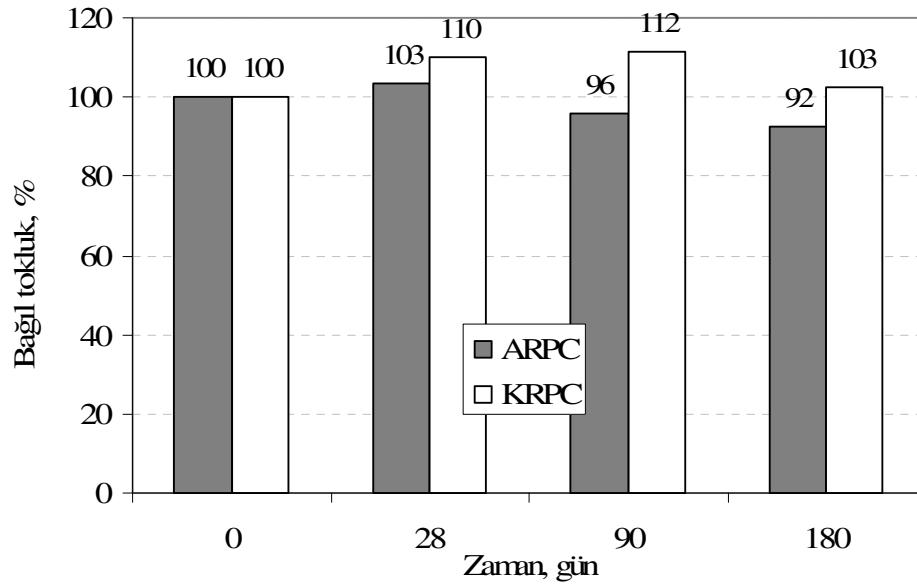
Şekil 9.14 %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde KRPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



Şekil 9.15 %10  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde ARPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



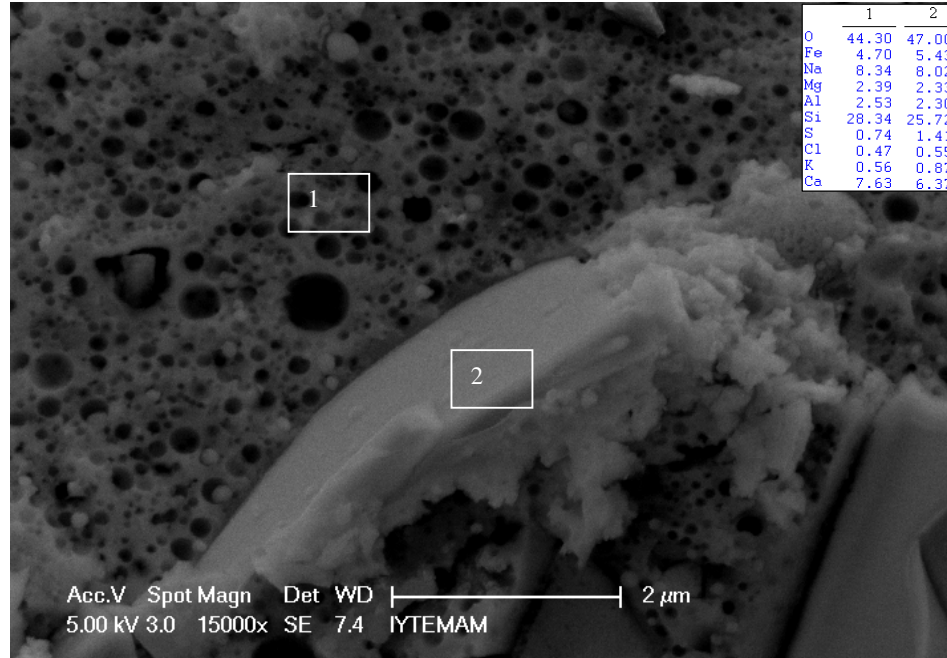
Şekil 9.16 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağıl eğilme dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.



Şekil 9.17 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağıl tokluk değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.

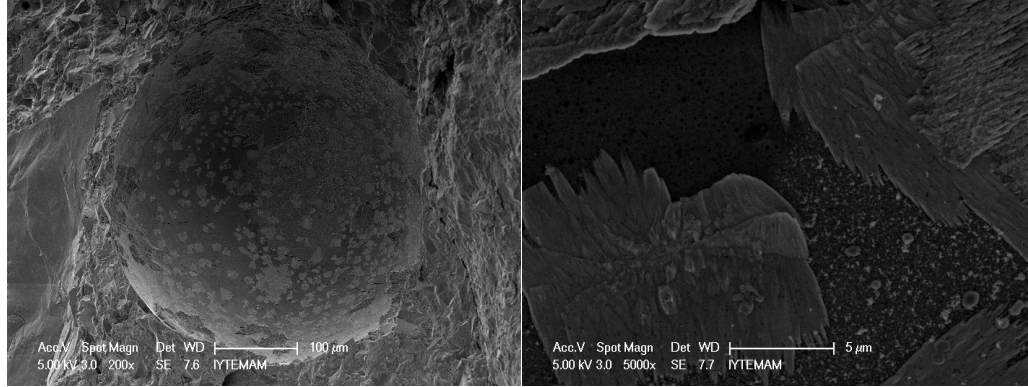
SEM incelemeleri 6 ay süreyle %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılan ARPC ve KRPC karışımları üzerinde yapılmış olup, inceleme yapılan bölge yüzeyden yaklaşık 500 µm mesafededir. Şekil 9.18'de çözeltiliye maruz bırakılmış ARPC karışımının matrisi ve iki farklı noktada yapılan EDS analizi verilmiştir. Deney öncesi duruma

göre Na miktarının önemli ölçüde arttığı dikkati çekmektedir. Çözeltiye maruz kalmadan önce Na içeriği %1,98-3,93 arasında iken (Tablo 8.6), bu değer çözeltiye maruz kaldıktan sonra %8'in üzerine çıkmıştır. Kükürt (S) miktarı ise önceki duruma göre benzerlik göstermektedir.



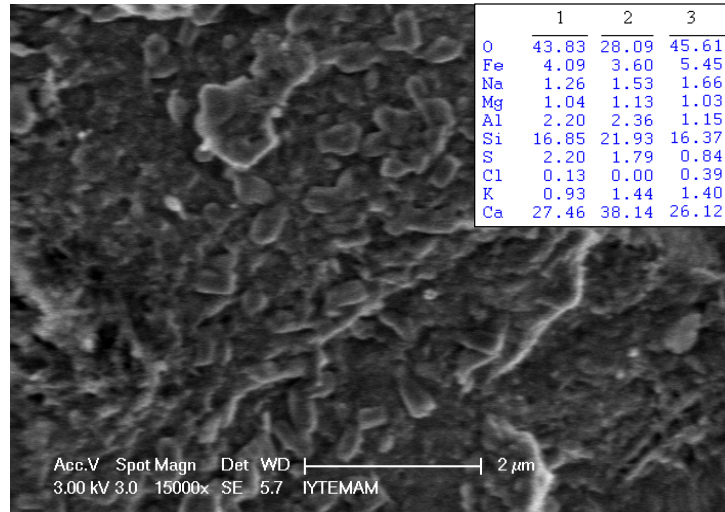
Şekil 9.18 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımı matrisinin SEM (SE) görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 9.19'da ARPC içerisindeki bir boşluk ve bu boşluk yüzeyinin 5000 kat büyütülmüş görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.19 ile kıyaslandığında çözeltiye maruz kalma sonunda boşluk yüzeyinde yeni bir takım oluşumlar meydana geldiği görülmektedir. Boşluğun derin olması nedeniyle bu boşlukta EDS analizi yapılamamıştır. Sadece boşluk yüzeyinde gözlenen bu yapıların, boşluk yüzeyini belli noktalarda sarmış olduğu ve genişleme yaratamayacak kadar düşük hacimli oldukları görülmüştür.



Şekil 9.19 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımının SEM (SE) görüntüsü a) boşluk (200x) b) boşluk içi (5000x).

Şekil 9.20'de KRPC karışımının matris görüntüsü ve 3 farklı noktada yapılan EDS analizi sonucu verilmiştir. Matriste çözeltiliye maruz kalmamış duruma kıyasla yeni oluşumlara rastlanılmamıştır. KRPC karışımının düşük geçirirliliğinin bir sonucu olarak, Na içeriğinin ARPC karışımının aksine önemli ölçüde düşük olduğu görülmüştür.

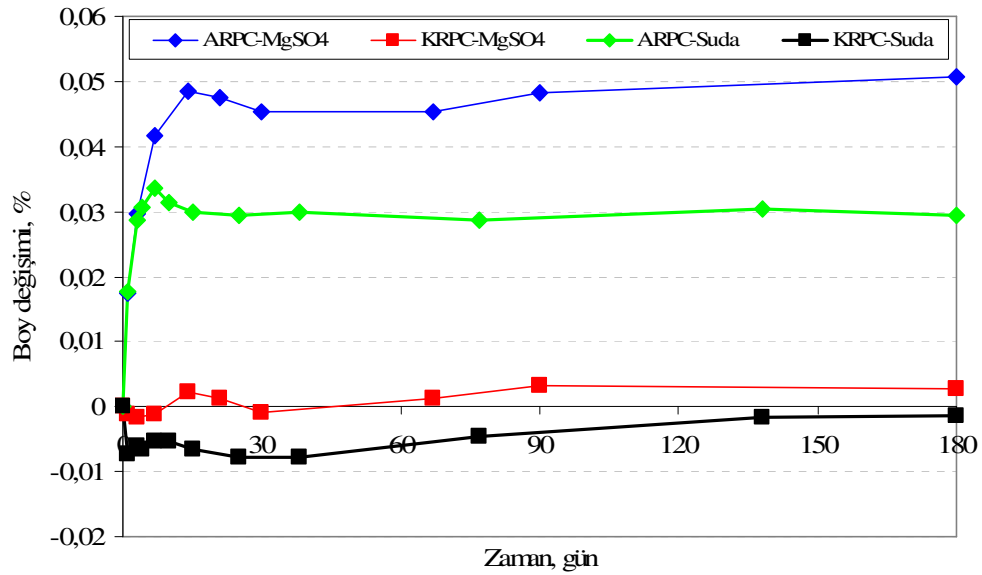


Şekil 9.20 %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış KRPC karışımını matrisinin SEM (SE) görüntüsü (15000x).

### 9.5.2 Magnezyum Sülfat Etkisine Dayanıklılık

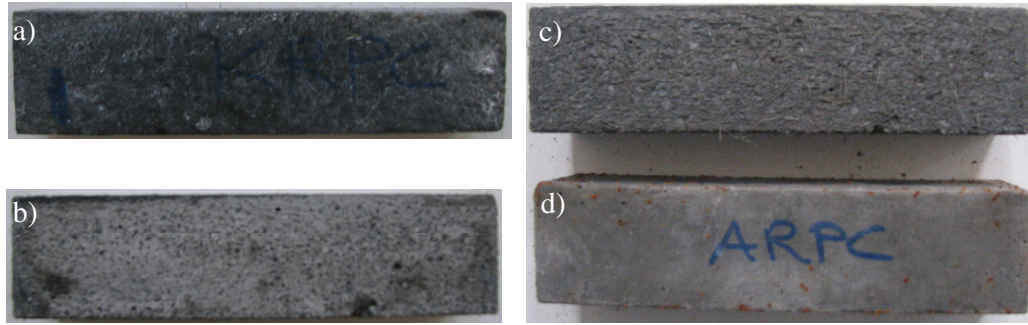
Altı ay süreyle magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılmış ARPC ve KRPC karışımlarının boy değişimleri Şekil 9.21'de verilmiştir. Magnezyum sülfat

çözeltisinde ARPC karışımı suda bekleyen numunelerden daha fazla genişleme göstermiştir. KRPC karışımı için ise durum sodyum sülfata benzerdir. ASTM C 1157 standardında 50 g/l  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde sülfata çok iyi dayanıklılık için verilen 6 aylık genişleme limiti, daha yüksek çözelti konsantrasyonuna ve sodyum sülfata kıyasla magnezyum sülfatın daha agresif bir ortam olmasına rağmen iki karışım için de aşılmamıştır.



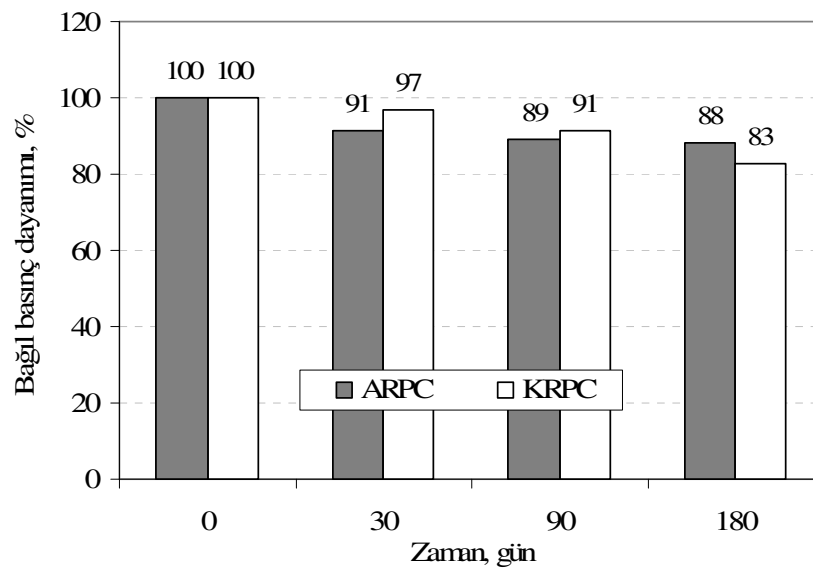
Şekil 9.21 %10  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının boy değişimi.

Şekil 9.22'de 3 ve 6 ay süreyle  $\text{MgSO}_4$  etkisine maruz kalmış örneklerin görünümü verilmiştir. Üç ay süreli deney sonucu KRPC karışımının yüzey kısmı  $\text{MgSO}_4$  çözeltisinin etkisiyle kabarmış (Şekil 9.22a) ve hafif bir fırçalama etkisiyle bozulan kısımları dökülmüştür (Şekil 9.22b). ARPC karışımı ise 6 ay süreyle maruz kalma sonunda bile görsel açıdan bir bozulma göstermezken, KRPC karışımında yüzeyden malzeme kaybı devam etmiştir.



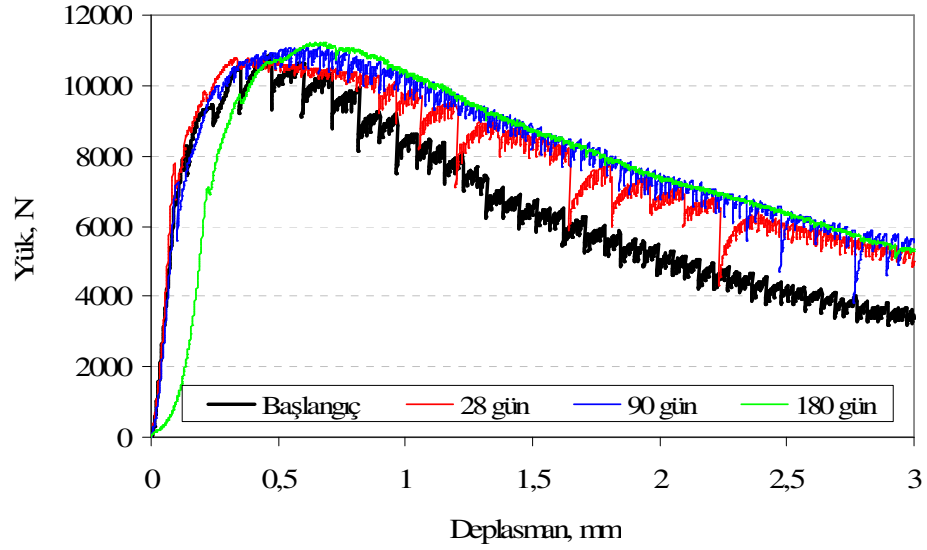
Şekil 9.22 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz kalmış örneklerin görünümü a ve b) KRPC 3 ay, c) KRPC 6 ay, d) ARPC 6 ay.

MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz kalma durumunda bağıl basınç dayanımı değişimi Şekil 9.23'te, bağıl eğilme dayanımı değişimi Şekil 9.26'da, bağıl tokluk değişimi ise Şekil 9.27'de verilmiştir. Yük-deplasman eğrisindeki değişim KRPC için Şekil 9.24'te, ARPC için Şekil 9.25'te verilmiştir. Mekanik özelliklerdeki kayıplar incelendiğinde her iki karışım için de kayıpların magnezyum sülfat çözeltisinde sodyum sülfat çözeltisinede kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak, kayıplar oldukça düşük mertebelerde ve her iki karışım için de benzerdir. En fazla mekanik kayıp, sodyum sülfat çözeltisine maruz bırakılan örneklerde olduğu gibi eğilme dayanımında ortaya çıkmıştır.

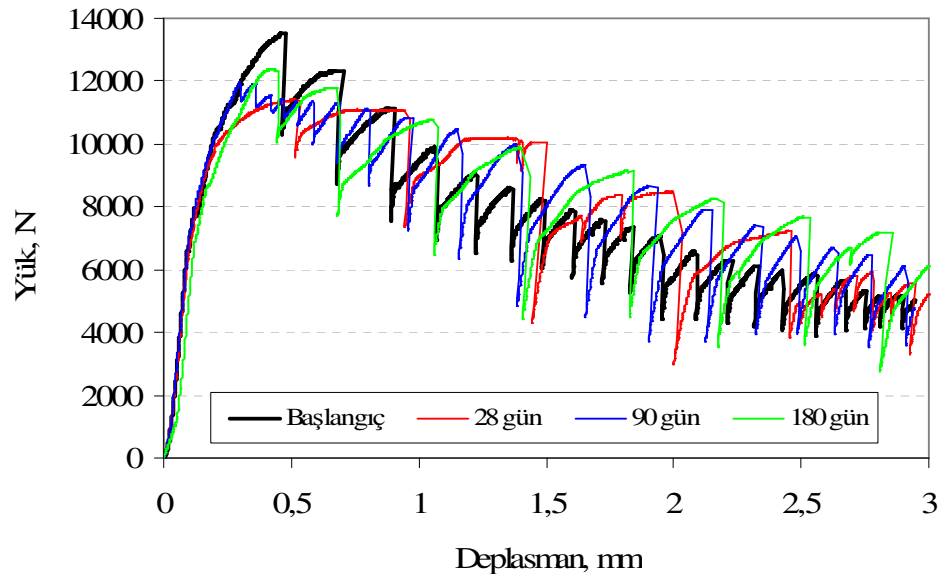


Şekil 9.23 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağıl basınç dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.

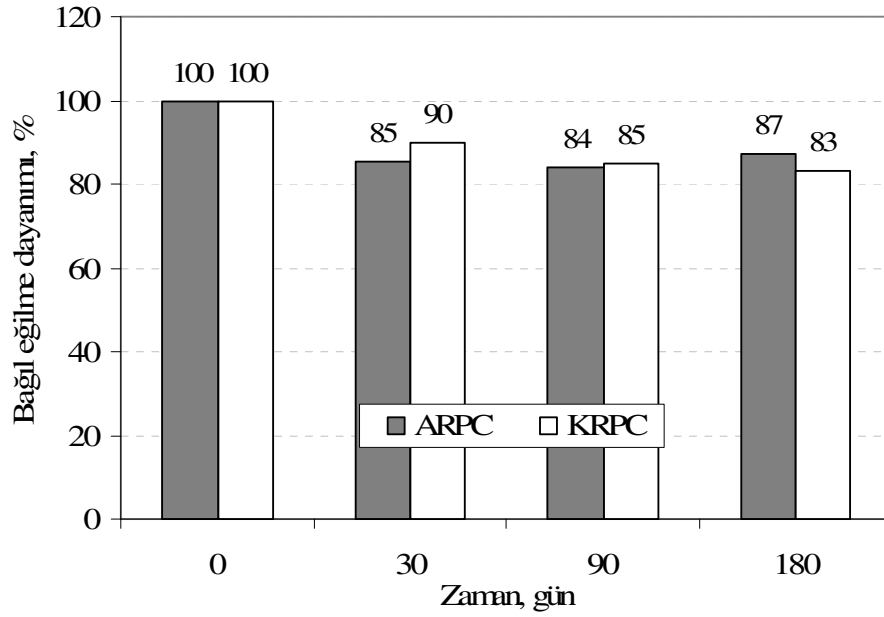




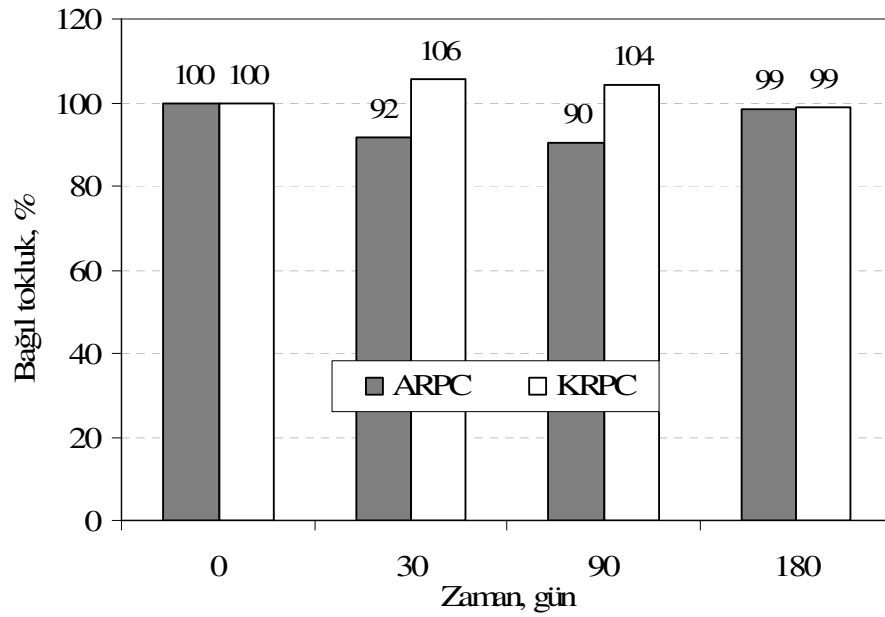
Şekil 9.24 %10  $MgSO_4$  çözeltisinde KRPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



Şekil 9.25 %10  $MgSO_4$  çözeltisinde ARPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



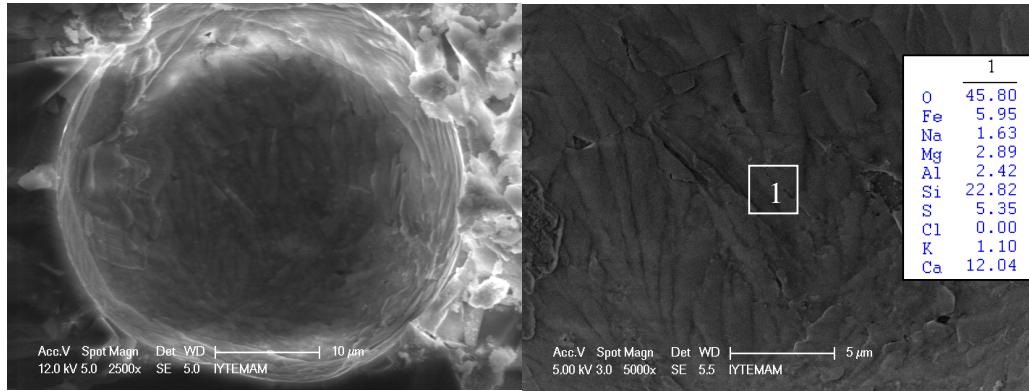
Şekil 9.26 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağlı eğilme dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.



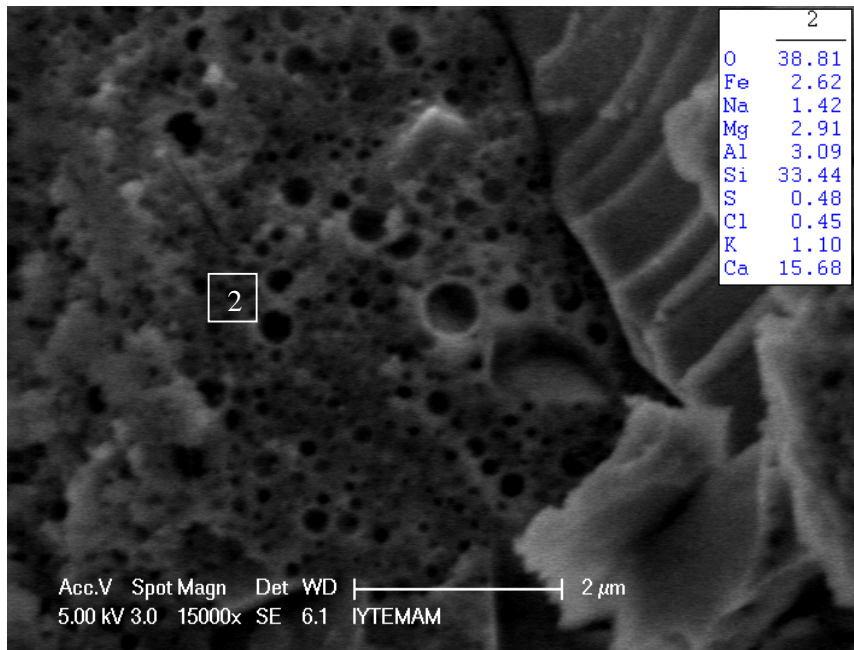
Şekil 9.27 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağlı tokluk değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 9.28'de 6 ay süreyle %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz kalmış ARPC karışımındaki bir boşluk içerisindeki oluşumlar ve bu oluşuma ait EDS analizi

verilmiştir. Boşluk içinde yapılan EDS analizi, Mg içeriğinin çözeltiye maruz kalmadan önceki duruma (Tablo 8.6) kıyasla bir miktar arttığını göstermiştir. Şekil 9.29'da matris fazının görünümü ve o bölgede yapılan EDS analizi verilmiştir. Çözeltiye maruz kalma sonunda matris yapısında herhangi bir değişiklik oluşmamıştır. Ancak matrisin Mg içeriği deney öncesi duruma (Tablo 8.6) kıyasla bir miktar artmıştır.

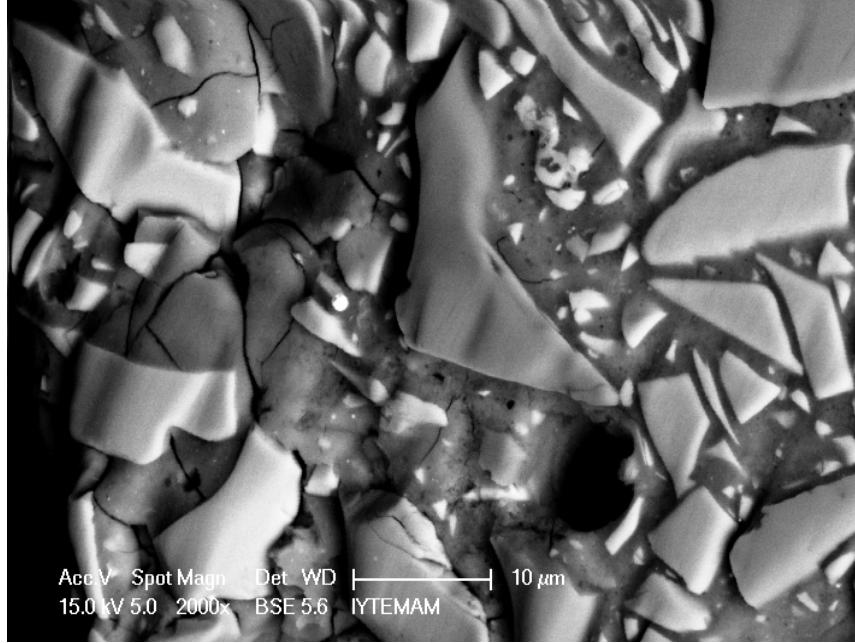


Şekil 9.28 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımının SEM (SE) görüntüsü a) boşluk (2500x) b) boşluk içi (5000x).



Şekil 9.29 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımı matrisinin SEM (SE) görüntüsü ve EDS analizi.

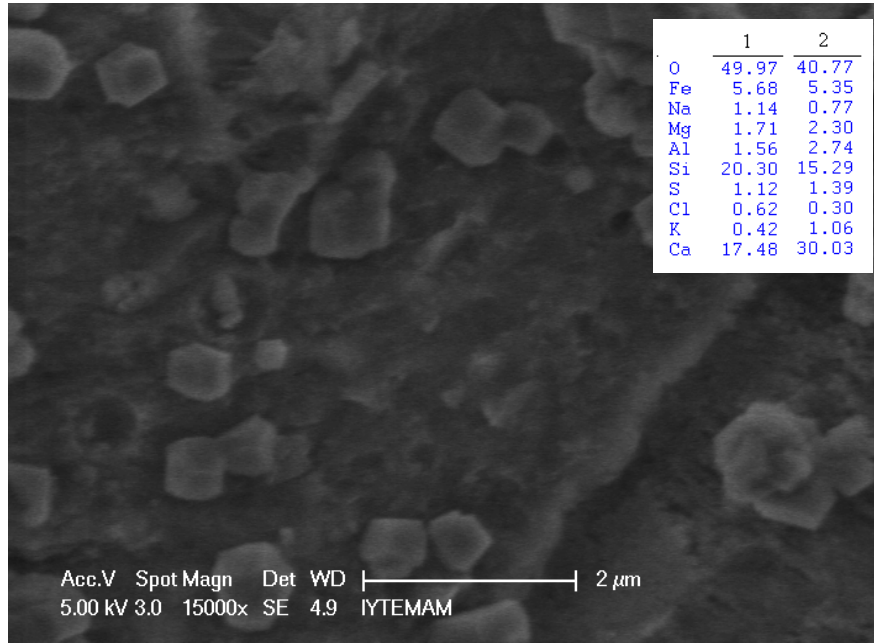
SEM (BSE) görüntüleri ARPC karışımının çözeltiye maruz kaldığı yüzeyden itibaren yaklaşık 20-25  $\mu\text{m}$ 'lik bir kısımda çatlak yoğunluğunun arttığını göstermiştir (Şekil 9.30).



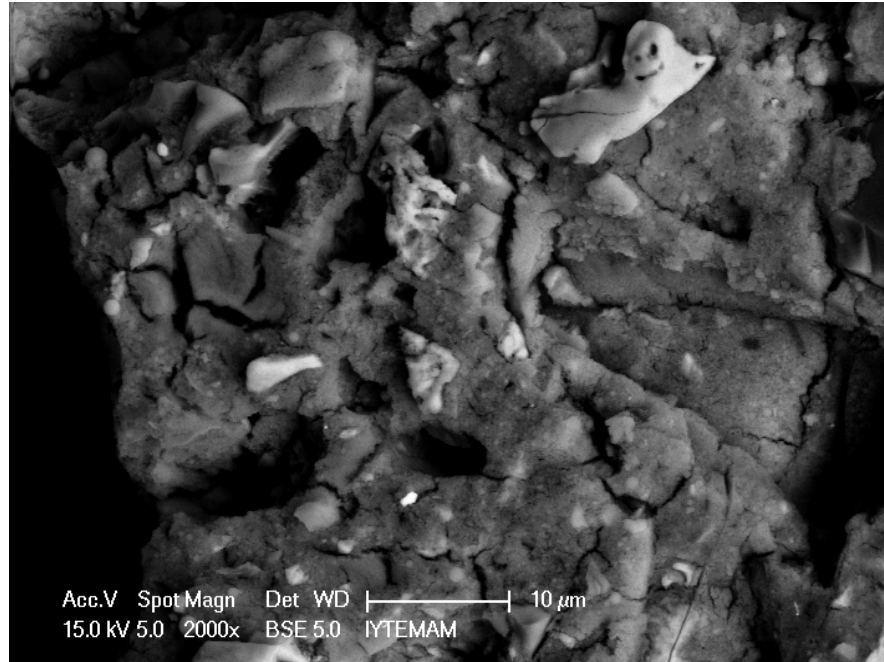
Şekil 9.30 %10  $\text{MgSO}_4$  çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımı matrisinin SEM (BSE) görüntüsü.

KRPC karışımının matrisinde çözeltiye maruz kalma sonunda bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 9.31). Yüzeyden etkilenen kısımda ise, çatlak yoğunluğunda önemli bir artış görülmemiştir (Şekil 9.32). Fakat daha önce de belirtildiği gibi, çözeltiye maruz kaldıktan sonra KRPC karışımının yüzeyinden itibaren belli kalınlıkta bir tabaka çözülerek uzaklaşmıştır. Sonuç olarak, KRPC karışımında düşük geçirimsizliğinden ötürü, çözelti girişi çok düşük mertebelerde kalmış, ancak çözeltiye temas eden yüzey kısmı hasar görmüştür. Bir başka deyişle, matris çözüldüğü zarar görmektedir. Ancak, karışımın düşük geçirimsizliği nedeniyle çözelti girişi pek mümkün olmadığından, zararın mertebesi düşük düzeyde ve yüzeyseldir. KRPC karışımı çözeltiye 6 ay maruz kalma sonunda yaklaşık %0,9 oranında ağırlık kaybına uğramıştır. ARPC karışımının ise, çözeltiye maruz kalan kısımları bile çözüldüğü zarar görmemiştir. Ancak, ARPC'nin porozitesi KRPC'ye kıyasla daha yüksek olduğu için, çözelti girişi nedeniyle genleşmelerde bir miktar

artış olmuştur. Ayrıca, çözelti girişi nedeniyle altı ay sonunda ARPC'nin ağırlığında %0,5'lik bir artış olmuştur. Görsel bozulma oluşmaması nedeniyle ARPC karışımı magnezyum sülfat etkisine maruz kalma durumunda KRPC'den daha uygundur.



Şekil 9.31 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış KRPC karışımı matrisinin SEM (SE) görüntüsü.



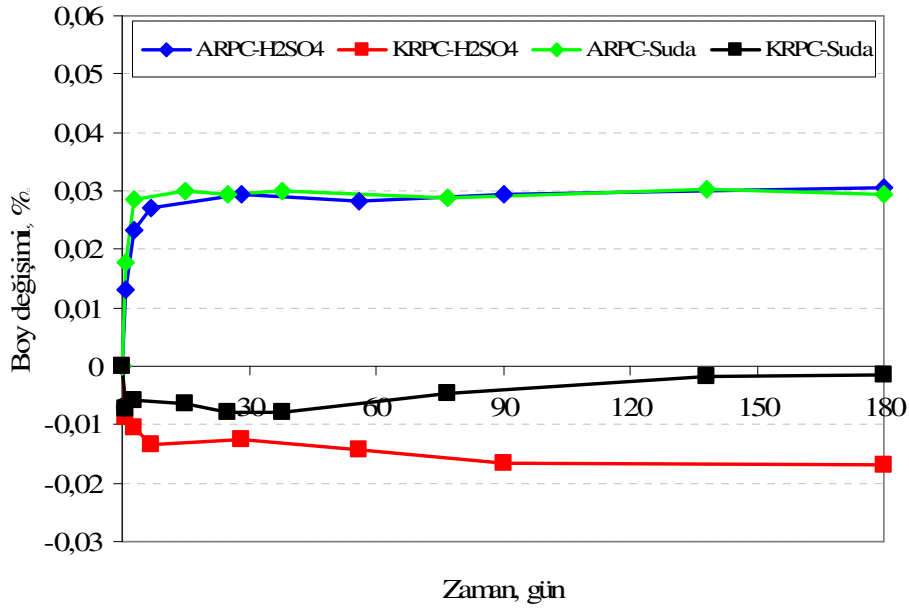
Şekil 9.32 %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış KRPC karışımı matrisinin SEM (BSE) görüntüsü.

Sülfat etkilerine karşı çimento bazlı malzemelerin dayanıklılığı, malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve geçirimsizliğine bağlıdır. ARPC karışımının sülfat etkilerine karşı yüksek dayanıklılığı  $\text{Ca(OH)}_2$  içermemesine (bk. Bölüm 8.6.4), KRPC karışımının yüksek dayanıklılığı ise geçirimsizliğinin çok yüksek olmasına (bk. Bölüm 8.6.5) bağlanabilir.

### 9.6 Sülfürik Asit Etkisine Dayanıklılık

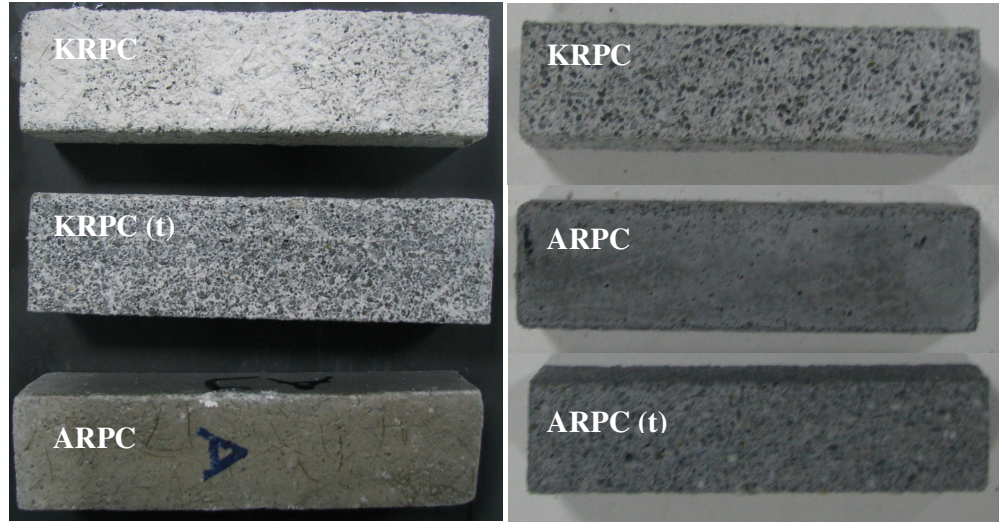
Sülfürik asit etkisine karşı karışımların dayanıklılığı, ayrıntıları Bölüm 5.2.13.4’te verilen yöntemle belirlenmiştir. Sülfürik asit, inorganik bir asit olup, ACI 201 (1992) “Guide to Durable Concrete” tarafından yapılan sınıflandırmaya göre en hızlı saldırıda bulunan asitler grubundandır. Asitler iyon değişimi ile çimento hamuru bileşenlerinden çözünebilen veya çözünmeyen kalsiyum tuzları meydana getirirler. Asitlerin sertleşmiş beton üzerindeki etkisi, kalsiyum bileşenlerini ( $\text{Ca(OH)}_2$ , C-S-H ve C-A-H), saldırıda bulunan asidin kalsiyum tuzlarına dönüştürmesi şeklinde gelişir. Kalsiyum tuzları çözündüklerinden, çimento harcı belirli zaman sürecinde çözünür ve beton harap olur. Sülfürik asidin çimento bileşenleriyle reaksiyonu ise kalsiyum sülfat (alçı) olumuna neden olur (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Şekil 9.33’te %5  $\text{H}_2\text{SO}_4$  çözeltisine maruz bırakılmış ARPC ve KRPC karışımlarının zamana bağlı genleşme eğrileri, aynı koşullarda su içerisinde bekletilen numunelerin genleşme eğrileri ile birlikte verilmiştir. ARPC karışımı hem suda hem de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  çözeltisinde aynı miktarda genişirken, KRPC karışımı büzülmüştür. Büzülme miktarı asit etkisinde sudakine kıyasla daha şiddetli olmuştur.



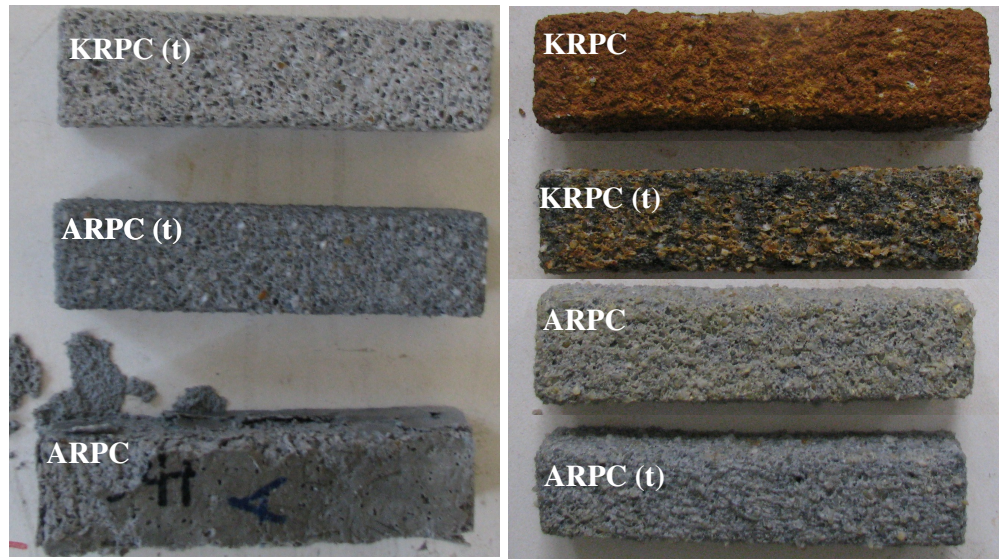
Şekil 9.33 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının boy değişimi.

Şekil 9.34'te H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz kalmış numunelerde zamanla oluşan görünüm değişiklikleri verilmiştir. Fotoğraflarda (t) simgesi numune yüzeyindeki kalıntılar temizlendikten sonraki durumu ifade etmektedir. Görüldüğü gibi, KRPC karışımı asit çözeltisine girdikten 1 gün sonra yüzeyinden ayrılmaya başlamıştır. ARPC karışımı ise, 7. günden itibaren çözeltiden etkilenmeye başlamıştır. Asit etkisi yüzeyden başlayarak ve yüzeyi yıpratarak ilerleyen bir reaksiyondur. Deneye tabi tutulan numunelerin geçirimsizliğinin oldukça düşük olduğu da göz önünde bulundurulursa, etkinin yüzeysel olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, zaman ilerledikçe örneklerin yüzeyindeki agregaların açığa çıktığı ve hamur fazının kaybolduğu açıkça görülebilmektedir. Altı ay sonunda ARPC %34, KRPC ise %38 ağırlık kaybı göstermiştir. KRPC karışımının yüzeyinde 6 ay sonunda oluşan kahverengi tonlarındaki renk değişiminin, liflerin korozyonundan kaynaklandığı sanılmaktadır.



a) 1 gün

b) 7 gün



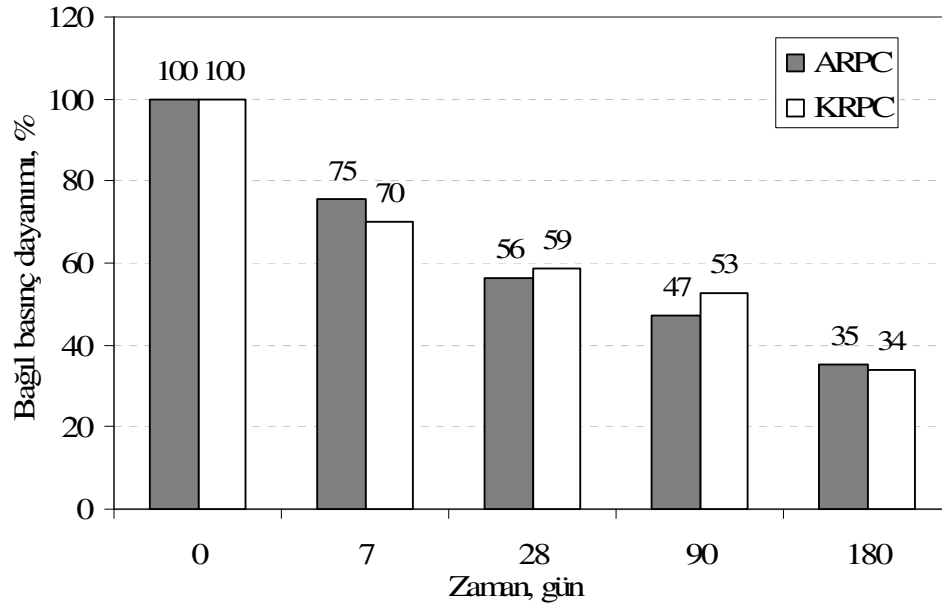
c) 28 gün

d) 180 gün

Şekil 9.34 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz kalmış örneklerin görünümü.

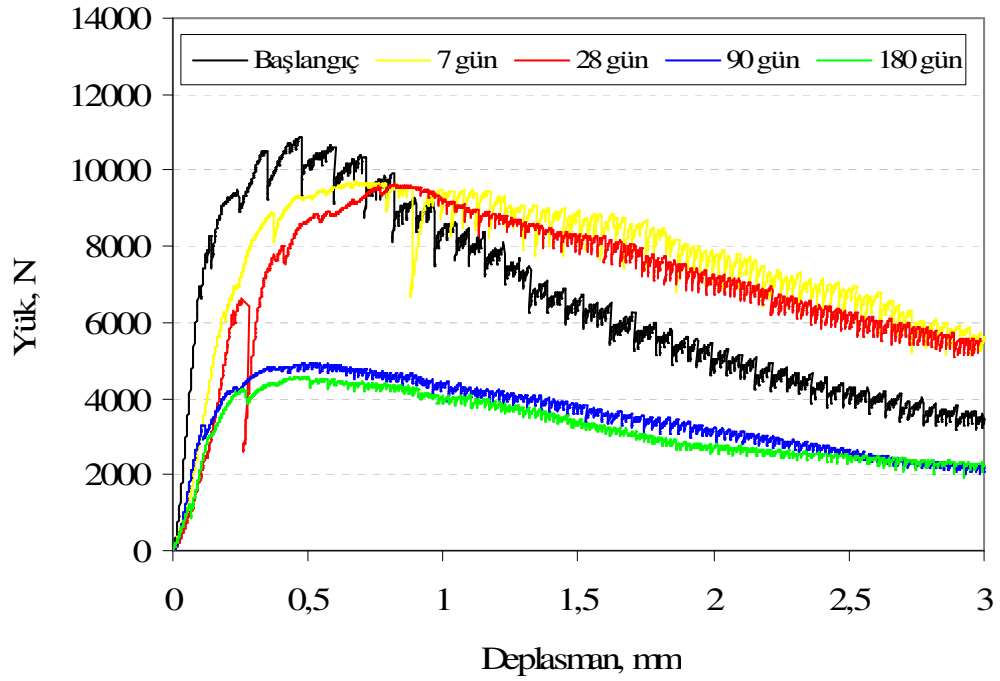
Sülfürik asit etkisinde mekanik özelliklerdeki azalmanın diğer kimyasal etkilere kıyasla çok daha şiddetli olduğu görülmektedir. Sülfürik asit etkisine maruz kalan ARPC ve KRPC karışımlarının basınç dayanımı kayıpları benzerdir (Şekil 9.35).



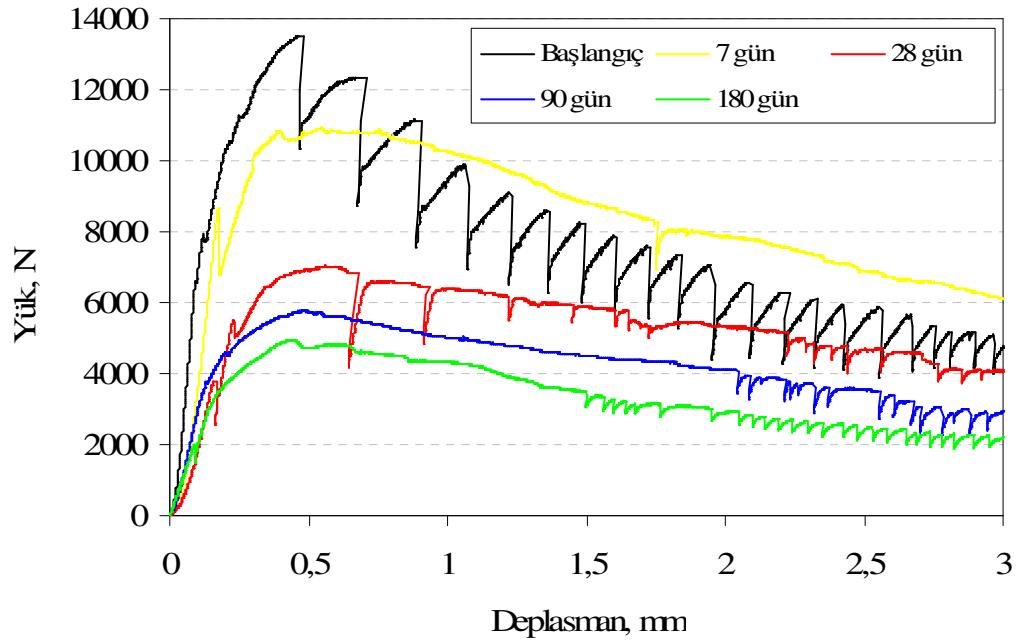


Şekil 9.35 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağıl basınç dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.

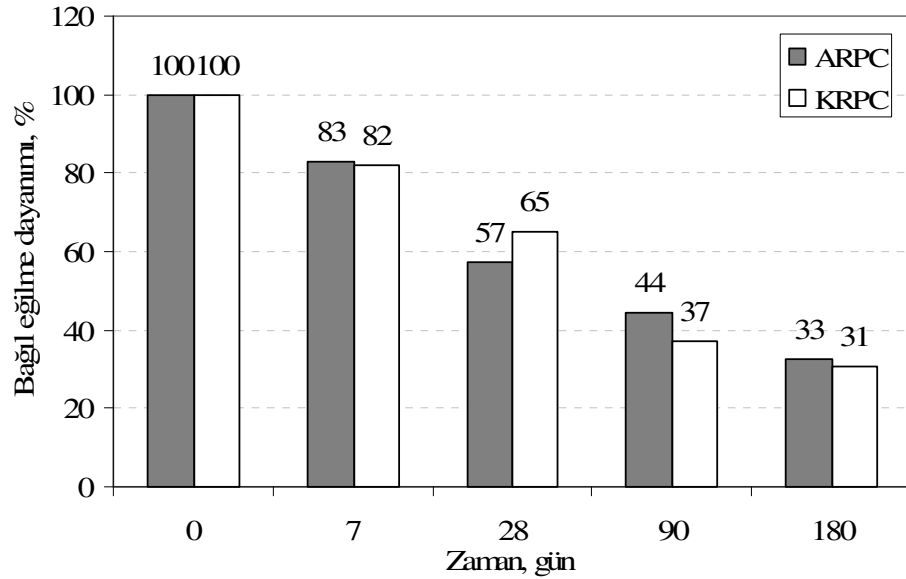
KRPC ve ARPC karışımı için yük-deplasman eğrileri sırasıyla Şekil 9.36 ve 9.37'de verilmiştir. Sodyum ve magnezyum sülfat etkisinde olduğu gibi, sülfürik asit etkisinde de eğrilerin formunun değiştiği görülmektedir. Eğrinin alçalan kısmının eğimi önemli ölçüde azalmıştır. Ani lif sıyrılmaları yerini daha tedrici sıyrılmaya bırakmıştır. Bu nedenle, tokluk kayıpları (Şekil 9.39) eğilme dayanımı kayıplarına (Şekil 9.38) kıyasla daha düşük mertebelerde olmuştur. Sonuç olarak, her iki karışımında asit etkisiyle önemli derecede mekanik özellik kaybı gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, mekanik özelliklerin hesaplanmasında kesit kayıplarının dikkate alınmadığı ve orijinal kesitler dikkate alınarak hesap yapıldığı belirtilmelidir. Ayrıca, her ne kadar kayıplar yüksek ise de, elde edilen performansın normal sınıflardaki betonlarla kıyaslanamayacak düzeyde yüksek olduğu belirtilmelidir. Günümüzde en sıklıkla kullanılan C20/25 sınıfı betonlar, bu konsantrasyondaki bir asit çözeltisinde bu süre zarfından tamamıyla çözünür.



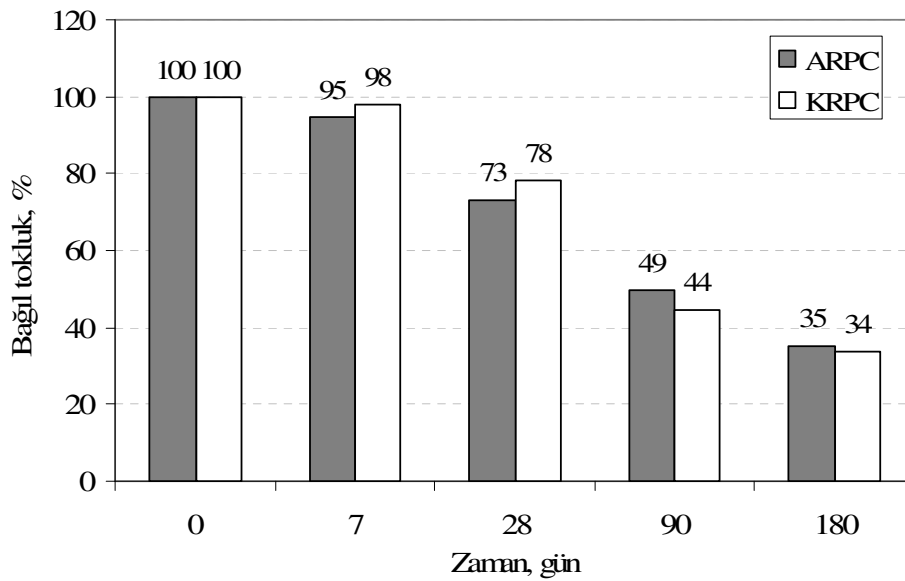
Şekil 9.36 %5  $H_2SO_4$  çözeltisinde KRPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



Şekil 9.37 %5  $H_2SO_4$  çözeltisinde ARPC karışımının zamana bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.



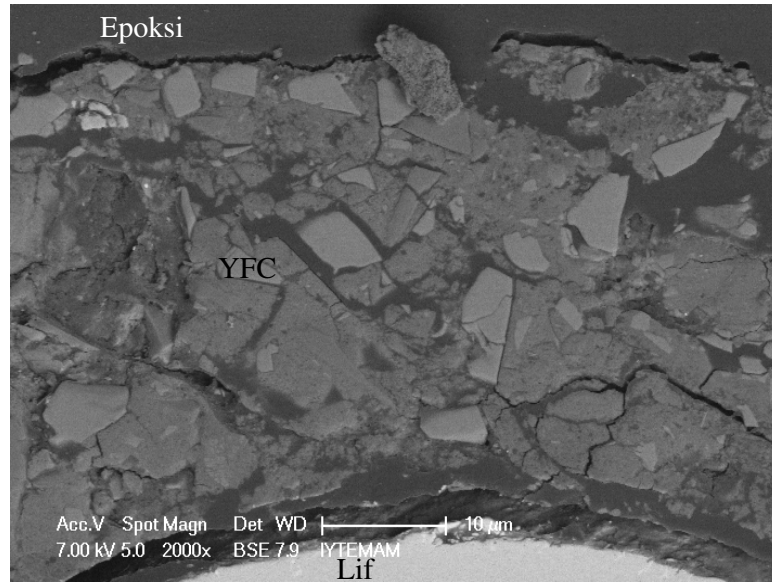
Şekil 9.38 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağlı eğilme dayanımının zamana bağlı olarak değişimi.



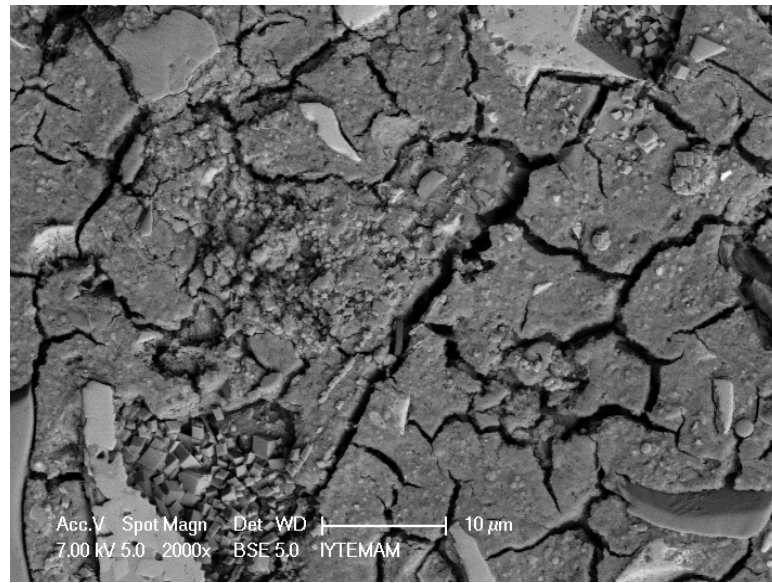
Şekil 9.39 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde ARPC ve KRPC karışımlarının bağlı tokluk değerlerinin zamana bağlı olarak değişimi.

Şekil 9.40 ve 9.41’de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC ve KRPC karışımlarının SEM (BSE) görüntüleri verilmiştir. Numunelerin çözeltiliye maruz kalan kısımları fotoğrafların üst bölümüne karşılık gelmektedir. ARPC karışımındaki çatlaklı kısımların, numune hazırlama esnasında epoksi ile dolduğu görülmektedir. Şekil 8.29 ile kıyaslandığında yüzeye yakın kısımlarda hidrate olmuş

matris yapısının değiştiği görülmektedir. Daha önce aynı büyütme oranında tespit edilebilen nanometre boyutundaki boşluklar görülememiştir. Bu değişiklik numune hazırlanmasından da kaynaklıyolabilir. KRPC karışımında da çatlaklı yapıda çözeltiye maruz kalmadan önceki duruma göre (şekil 8.35) nemli bir artış ortaya çıkmıştır (şekil 9.41).



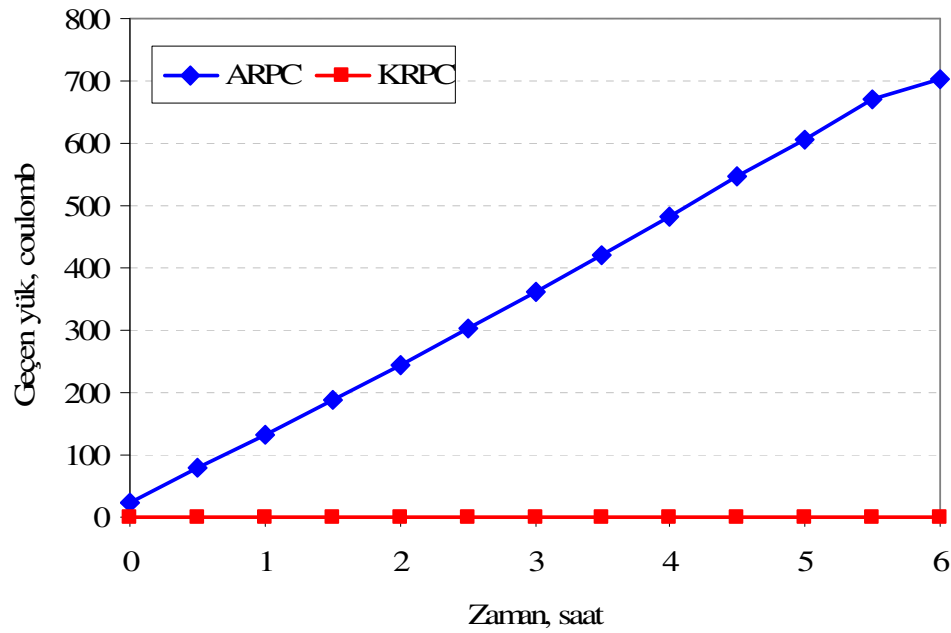
şekil 9.40 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> zeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış ARPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü.



şekil 9.41 %5 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> zeltisine 6 ay süreyle maruz kalmış KRPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü.

### 9.7 Hızlı Klorür İyonu Geçirirliliği

Hızlı klorür iyonu geçirirliliği deneyi, ayrıntıları Bölüm 5.2.13.5’te verilen yöntemle, lifsiz ARPC ve KRPC karışımları üzerinde yapılmıştır. Şekil 9.42’de geçen yük miktarının zamanla değişimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi KRPC karışımında yük geçişi olmaz iken, ARPC karışımında 6 saat sonunda 700 coulomb yük geçişi olmuştur.



Şekil 9.42 ARPC ve KRPC karışımları hızlı klorür iyon geçirirliliği deneyi yük-zaman grafiği.

ASTM C 1202 “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” standardı sınıflandırmasına göre betonlar Tablo 9.1’de görülen beş geçirirlilik sınıfına ayrılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre, KRPC için klor geçirirliliği ihmal edilebilir sınıfta iken, ARPC karışımı çok düşük sınıfına girmektedir.

Tablo 9.1 Hızlı klorür geçirimsizliği sınıfları (ASTM C 1202)

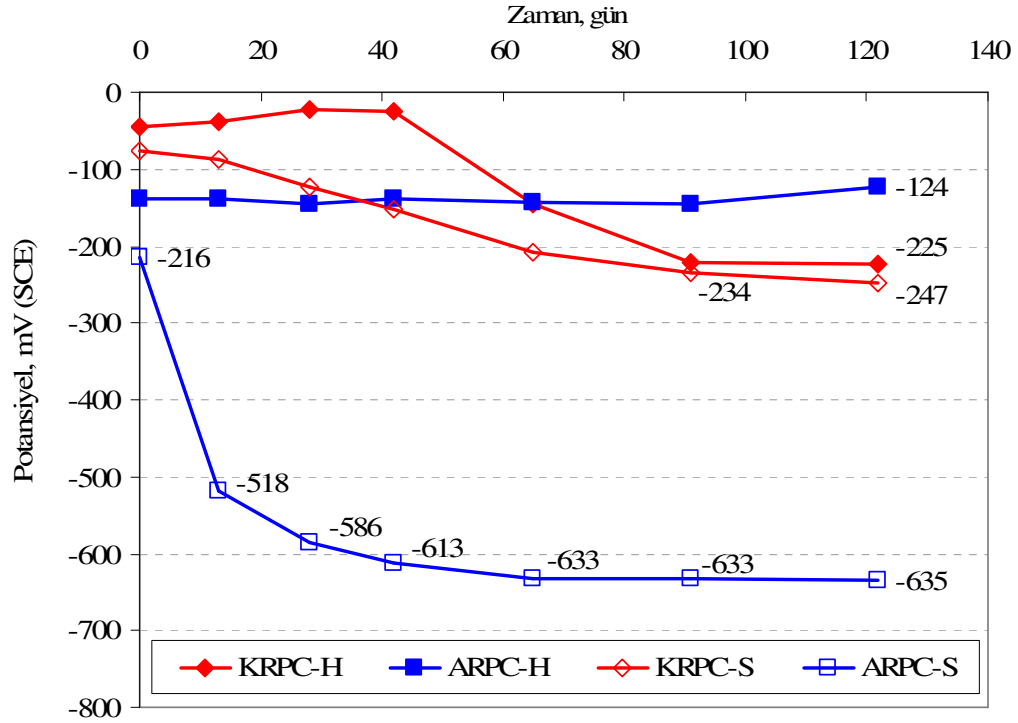
Hücreden geçen yük değeri, coulomb	Klor geçirimsizlik sınıfı
< 100	İhmal edilebilir
100 – 1000	Çok düşük
1000 – 2000	Düşük
2000 – 4000	Orta
> 4000	Yüksek

Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği deneyi, elektriksel iletkenliğin bir ölçümü olup, betonun boşluk yapısına ve boşluk çözeltilisinin kimyasına bağlıdır. PÇ yerine çeşitli bağlayıcı katkı maddelerinin ilavesi, boşluk çözeltilisinin kimyasını değiştirmesi nedeniyle geçen yük miktarını %90'dan daha fazla azaltsa da klorür iyonlarının transferini çok az etkilemektedir. Yiğiter (2008) uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun çimento yerine ikamesi ile betonun elektriksel direncinin arttığını bildirmiştir. Bu nedenle, bağlayıcısı yüksek fırın cürufu olan ARPC karışımından geçen yük miktarının bağlayıcısı çimento olan KRPC karışımından daha az olması beklenirdi. Ancak, Shi, Krivenko ve Roy (2006) AA-YFC betonlarında sodyum silikat/YFC oranı arttıkça geçen yük miktarının arttığını bildirmiştir. Bu durum, geçen yük miktarının betonun boşluk çözeltilisindeki alkali konsantrasyonu ile yakından ilgili olduğunu gösterir. AA-YFC betonlarında boşluk çözeltilisinin kimyasının elektriksel iletkenlik veya geçen yük üzerindeki etkisinin boşluk yapısından daha fazla etkili olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, ARPC karışımından geçen yük miktarının KRPC karışımına kıyasla daha yüksek olması, daha boşluklu yapıda olmasının yanında, bu betonların boşluk çözeltilisinin kimyasal yapısındaki değişim ile de önemli ölçüde bağlantılıdır. Elde edilen verilerden, ARPC karışımının elektriksel direncinin KRPC karışımından daha düşük olduğu söylenebilir. Ancak, deney sonuçlarının yukarıda anlatılan nedenlerle klorür iyonu geçirimsizliği hakkında sağlıklı bir bilgi vermediği düşünülmektedir.

## 9.8 Çelik Donatının Korozyonu

Çelik donatının korozyonuna yönelik deneyler Bölüm 5.2.13.6'da verilen yöntemle yapılmıştır. Deneyler, lifsiz ARPC ve KRPC karışımlarından üretilen donatılı beton numuneler üzerinde yapılmıştır. Pas payı tabakası kalınlığı 10 mm olan donatılı beton numunelerin bir kısmı atmosfer koşullarında bekletilmiş, bir kısmı sürekli olarak su içerisinde saklanmış ve diğer kısmı da benzeştirilmiş deniz suyu (%3,5 NaCl çözeltisi) içerisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmıştır. Havada ve su içerisinde bekletilen numunelerin elektrot potansiyeli değerleri belli zaman aralıklarında belirlenmiştir. Yüzde 3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılan örnekler üzerinde ise, elektrot potansiyeli okumaları ve polarizasyon çalışmaları yapılmıştır. Örnekler üzerinde yapılan korozyon deneylerinde, numunelerin korozyon potansiyeli ( $E_{corr}$ ) değerleri ve korozyon akım yoğunluğu ( $I_{corr}$ ) değerleri tespit edilmiştir.

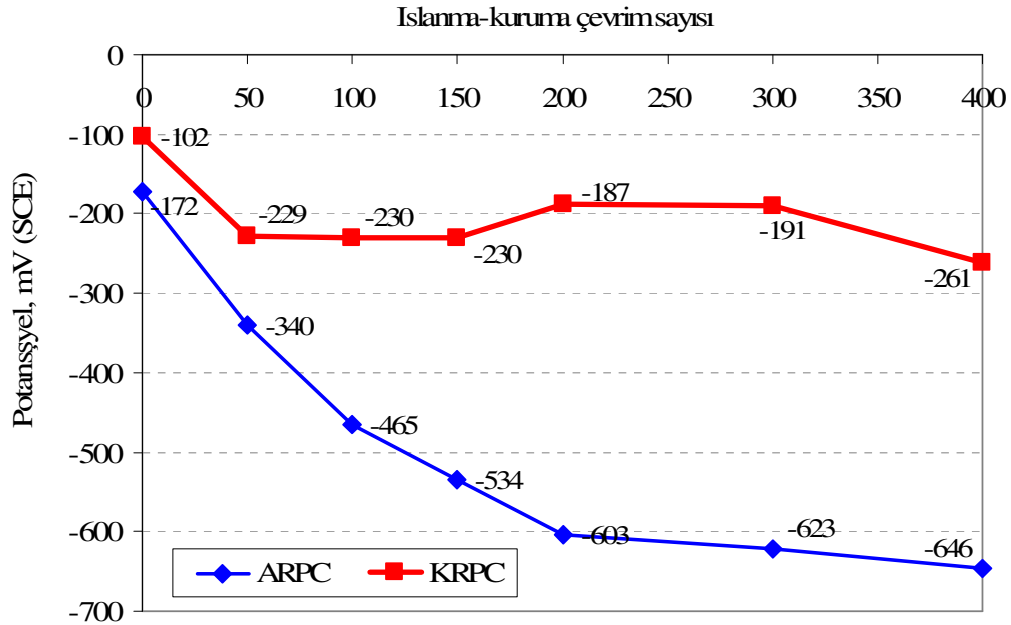
Havada (H) ve suda (S) bekletilen numunelerin elektrot potansiyellerinin zamanla değişimi Şekil 9.43'te verilmiştir. Ölçümler, ıslanma-kuruma çevrimlerine maruz bırakılan numuneler için yapılan ölçüm zamanlarında yapılmıştır (Örneğin 50 çevrim=13. gün). Su içerisinde bekletilen numunelerin elektrot potansiyellerinin havadakine kıyasla daha negatif olduğu görülmektedir. Havada bekletilen ARPC karışımının elektrot potansiyeli havada bekletilen KRPC karışımına kıyasla daha az negatifken, su içerisinde bekletilen numunelerde ARPC karışımının negatiflik seviyesi daha KRPC'den daha fazladır. Havada bekletilen ARPC ve KRPC karışımlarının korozyon potansiyeli değerinin ASTM C 876 "Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete" standardına göre aktif korozyon gelişimi açısından kalitatif bir sınır olarak kabul edilen -270 mV'dan daha pozitif yönde olduğu görülmektedir. Bu durum potansiyel ölçümlerine göre aktif korozyon gelişiminin olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, suda bekletilen ARPC karışımının ilk günlerden itibaren sınır değeri aştığı ve aktif korozyon gelişimi bölgesine girdiği görülmektedir. KRPC karışımı ise 120. gün itibariyle bu değere oldukça yaklaşmıştır.



Şekil 9.43 Havada ve suda bekletilen ARPC ve KRPC karışımlarının elektrot potansiyellerinin zamanla değişimi.

NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına bağlı olarak korozyon potansiyeli değerleri Şekil 9.44'te verilmiştir. Islanma-kuruma çevrimlerinin ardından yapılan ölçümler numuneler doygun durumda iken yapılmıştır. Korozif ortamda bekleyen numunelerin analizine bakıldığında, ARPC için korozyon potansiyeli değerlerinin 50. çevrimden itibaren -270 mV değerinden çok daha negatif olduğu tespit edilmiştir. Bu durum aktif korozyon gelişiminin bir göstergesidir. KRPC karışımı ise, -270 mV değerine 400 çevrim sonucunda henüz yaklaşmıştır. ASTM C 876'ya göre, donatıların elektrot potansiyeli değerlerinin yalnızca korozyon gelişimi olup olmadığı hakkında fikir verdiğini belirtmekte fayda vardır. Korozyonun gelişim hızı ve yoğunluğu konusunda bilgi sağlayamamaktadır.



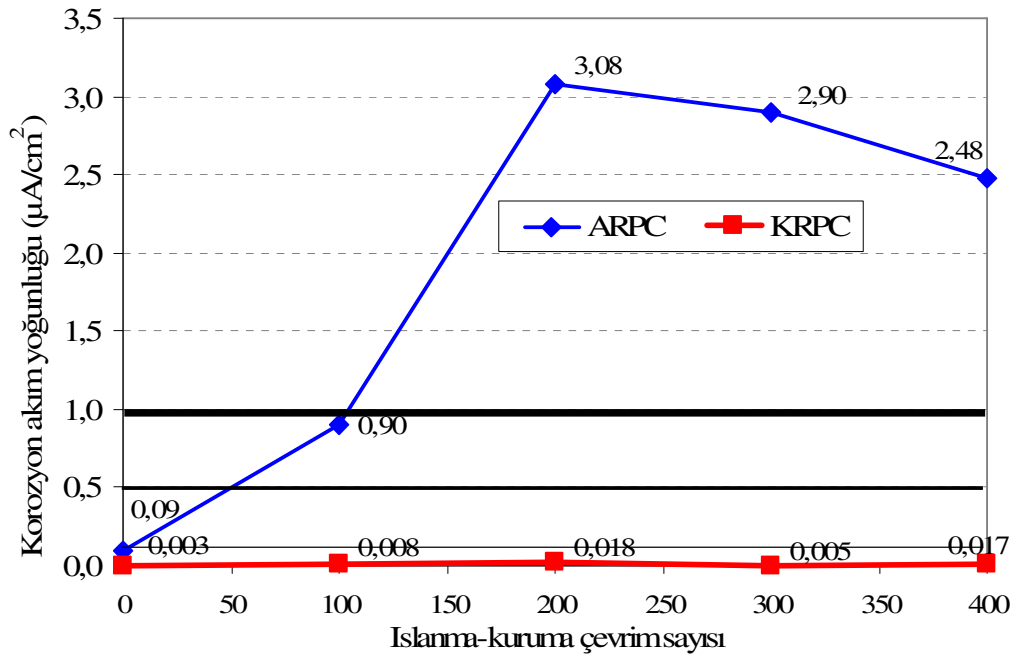


Şekil 9.44 ARPC ve KRPC karışımlarının %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrim sayısına bağlı olarak korozyon potansiyeli değerlerinin değişimi.

Şekil 9.45'te NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkileri ile korozyon akım yoğunluğunun değişimi verilmiştir. Grafikte  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ve  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  seviyelerindeki yatay çizgiler korozyon hızı sınıflandırmalarındaki limitleri göstermektedir. Korozyon akım yoğunluğu  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  değerinin altında ise korozyon gelişimi ihmal edilebilir düzeydedir. Akım yoğunluğu değerinin  $0,1$  ile  $0,5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  arasında olması düşük korozyon hızlarının,  $0,5$  ile  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  arasında olması ise orta seviyede korozyon hızlarının göstergesidir. Korozyon akım yoğunluğu  $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'nin üzerinde olduğunda yüksek hızda korozyon gelişimi söz konusudur (ACI 222R-01, 2001). KRPC için korozyon akım yoğunluğu değerleri 400 çevrim sonunda bile ihmal edilebilir düzeydeyken, ARPC karışımında 100 çevrimin üzerinde korozyon hızının yüksek hızda korozyon sınırını aştığı görülmüştür. 200 çevrime kadar korozyon hızının ilk 100 çevrime kıyasla daha yüksek hızda arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, 200 çevrimin üzerinde korozyon hızı azalmaya başlamıştır. Yiğiter (2008) tarafından yapılan çalışmalarda, basınç dayanımı 38,2 MPa ve pas payı tabakası kalınlığı 10 mm olan numunelerin 100 çevrim sonunda korozyon hızının yaklaşık  $1,6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  olduğu belirlenmiştir. Bir başka deyiş ile ARPC karışımı normal dayanım sınıfındaki bir betona göre klorür

korozyonuna daha dayanıklı olsa da, KRPC karışımı karşılaştırılmayacak düzeyde yüksek bir performans sergilemiştir.

Gravimetrik ölçümler ile bulunan kütle kayıpları elektrokimyasal yöntemlerden elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olup, ARPC'nin klorür korozyonuna karşı donatı çeliğini korumada KRPC'ye kıyasla daha az başarılı olduğunu göstermiştir. Numune içerisinden çıkarılan ve Clarke çözeltisi ile yıkanarak temizlenen donatılar üzerinde yapılan ağırlık ölçümleri, ARPC karışımı içerisindeki donatının 400 çevrim sonunda %0,33, KRPC karışımı içerisindeki donatının ise %0,22 oranında ağırlık kaybına uğradığını göstermiştir. Bununla birlikte, oluşan ağırlık kayıpları arasındaki fark, korozyon ölçümlerinde elde edilen sonuçlara kıyasla çok daha azdır. Benzer sonuç, Yiğiter (2008) tarafından da rapor edilmiş olup, olayın nedeni donatıların temizlenmesi sırasında HCl etkisi ile ilave kayıpların oluşmasına bağlanmıştır.



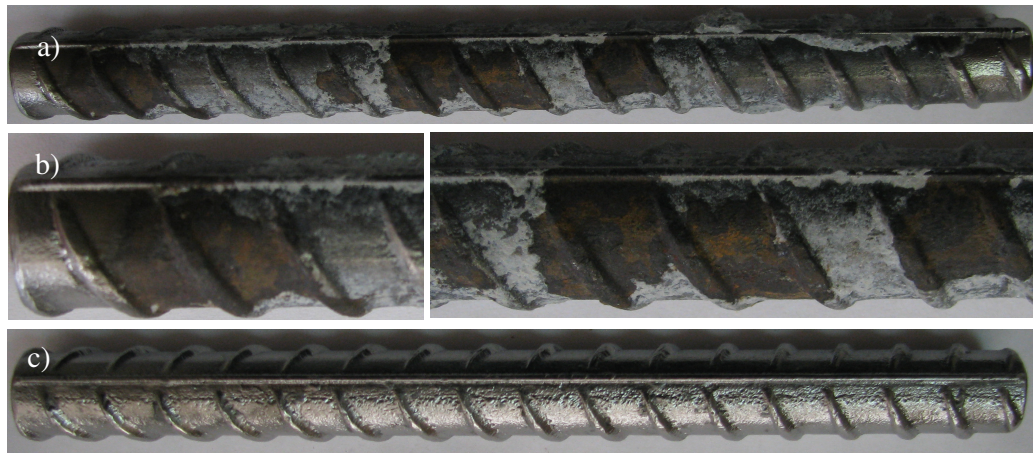
Şekil 9.45 ARPC ve KRPC karışımlarının %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkileri ile korozyon akım yoğunluğunun değişimi.

Şekil 9.46'da NaCl çözeltisinde 400 çevrim ıslanma-kurumaya maruz bırakılmış numunelerden kırılarak açığa çıkarılan donatıların durumu görülmektedir. KRPC karışımı içerisindeki donatıda herhangi bir korozyon belirtisine rastlanılmamıştır.

Bununla birlikte ARPC karışımı içerisindeki donatıda lokal korozif bölgelerin oluştuğu görülmektedir. ARPC karışımı içinden çıkarılan donatının daha detaylı durumu Şekil 9.47a ve 9.47b’de görülmektedir. Clarke çözeltisi ile temizlendikten sonraki durumu ise Şekil 9.47c’de verilmiştir.



Şekil 9.46 %3,5 NaCl çözeltisinde 400 çevrim ıslanma-kuruma sonunda ARPC ve KRPC karışımlarında donatıda korozyon oluşumları.



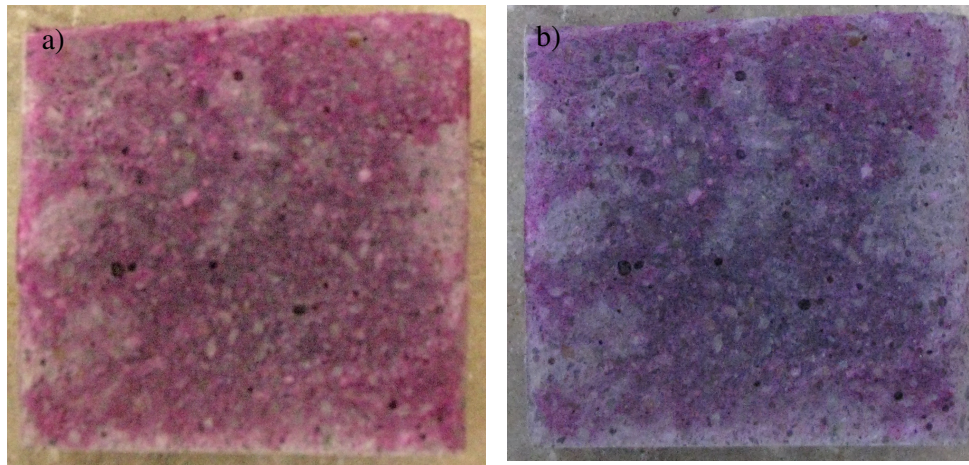
Şekil 9.47 %3,5 NaCl çözeltisinde 400 ıslanma-kuruma çevrimi sonunda ARPC içinden çıkan donatı, a ve b) korozyona uğramış durum c) Clarke çözeltisi ile yıkanarak temizlendikten sonraki durum.

Klor işleme derinliği ölçümleri, klor iyonlarının işleme derinliğinin ARPC’de KRPC’ye kıyasla daha fazla olduğunu göstermiştir. Ortalama klor işleme derinliğinin 100, 200 ve 400 çevrimde ARPC için sırasıyla 1,6, 3,4 ve 11,4 mm olduğunu, KRPC için ise sırasıyla 0,8, 1,8 ve 10 mm olduğunu göstermiş olup, ARPC’nin daha yüksek korozyonunu açıklamaktadır.

Bu durum yüksek korozyon riski bulunan yapılarda, örneğin endüstriyel klor havuzlarında ARPC'nin kullanımının uygun olmadığına işaret etmektedir.

### 9.9 Karbonatlaşma

Ayrıntıları Bölüm 5.2.13.7'de verilen karbonatlaşma deneyleri, 6 ay süreyle havada ve karbonatlaşmış suda ( $0,352 \text{ M NaHCO}_3$ ) bekletilen numunelerde karbonatlaşma oluşmadığını göstermiştir. Şekil 9.48'de yüzeyine %0,1 phenolphthalein alkol eriyiği püskürtülmüş 6 ay süreyle karbonatlaşmış suda bekletilmiş numuneler görülmektedir. Bu yöntemde, karbonatlaşmamış tabaka kırmızı-mor renk alırken, pH değeri 8,3'ün altında olan kısımda renk değişimi görülmemektedir. Şekil 9.48'den görüldüğü gibi, hem ARPC hem de KRPC karışımının tüm yüzeyi kırmızı-mor renk vermiştir. Bir başka deyişle, 6 aylık süre zarfında pH değeri 8,3'ün altına düşen kısım olmamıştır. Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2001a), 42 MPa basınç dayanımına sahip olan AA-YFC ve PÇ betonlarını  $0,352 \text{ M NaHCO}_3$  çözeltisine maruz bırakmıştır. Beş ay sonunda AA-YFC betonlarının 12 mm, PÇ betonlarının ise 7 mm kalınlığında karbonatlaştığı görülmüştür. Bu sonuç, ARPC ve KRPC karışımlarının karbonatlaşmaya karşı dayanıklılığının oldukça yüksek olduğunu gösterir.



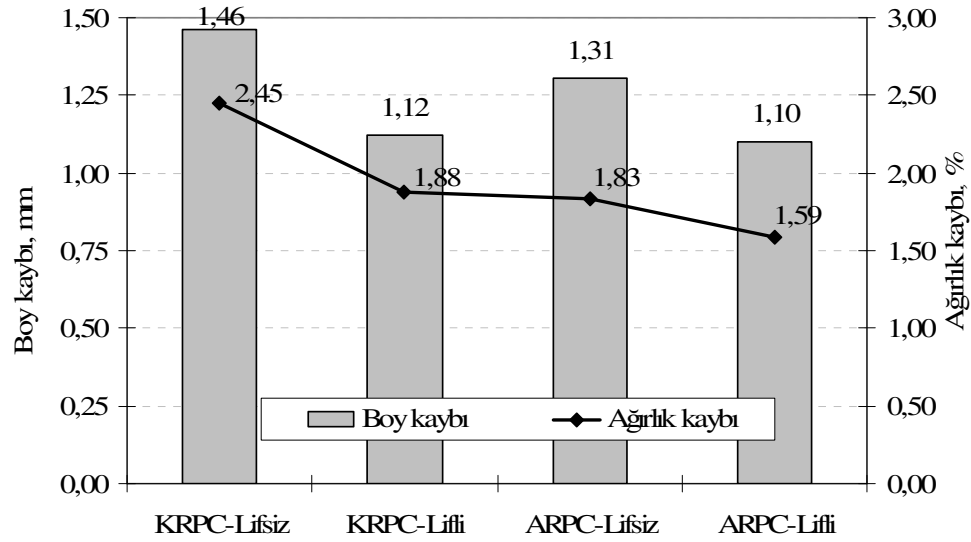
Şekil 9.48 Yüzeyine %0,1 phenolphthalein alkol eriyiği püskürtülmüş 6 ay süreyle karbonatlaşmış suda bekletilmiş a) ARPC ve b) KRPC karışımı.

Alkalilerle aktivasyon yöntemiyle üretilen bağlayıcıların karbonatlaşma direnci konusunda diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda oldukça farklı sonuçlar sunulmuştur. Ionescu ve Ispas (1986) ve Xu ve Pu (1999) AA-YFC bağlayıcılarının karbonatlaşma hızının PÇ bağlayıcılarına benzer veya daha yavaş olduğunu bildirmiştir. Bununla birlikte, Byfors ve diğer. (1989) ve Bakharev, Sanjayan ve Cheng (2001a) alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların daha hızlı karbonatlaştıklarını bildirmiştir. Karbonatlaşma hızı, ortam koşullarının yanı sıra bağlayıcının  $\text{Ca(OH)}_2$  içeriğine, C-S-H yapının özelliklerine ve geçirimsizliğe bağlıdır. ARPC karışımı KRPC karışımından daha geçirimsiz olsa da, geçirimsizliği normal sınıftaki betonlara kıyasla daha düşüktür. Bununla birlikte, ARPC karışımı  $\text{Ca(OH)}_2$  içermemektedir ve C-S-H yapısının Ca/Si oranı KRPC'den daha düşüktür. Ancak, ARPC karışımının yapısında bulunan sodyum boşluk çözeltisinin pH'ını arttırıcı bir bileşen olması nedeniyle karbonatlaşmaya karşı direnci arttırıcı bir unsurdur.

Sonuç olarak, KRPC karışımı düşük geçirimsizliği, yapısında  $\text{Ca(OH)}_2$  içermesi ve C-S-H yapısının Ca/Si oranının daha yüksek olması nedeniyle, ARPC ise düşük geçirimsizliği ve yapısındaki sodyum nedeniyle deney yapılan sürede karbonatlaşmamıştır.

### 9.10 Aşınma Dayanıklılığı

Ayrıntıları Bölüm 5.2.13.8'de verilen Böhme aşınmaya dayanıklılık deneyi, lifsiz ve lifli ARPC ve KRPC karışımları üzerinde yapılmıştır. Deney sonrasında numune yüksekliğinde ve ağırlığında oluşan azalma değerleri Şekil 9.49'da verilmiştir. ARPC karışımının aşınma etkilerine karşı dayanıklılığının KRPC karışımına kıyasla daha üstün olduğu görülmüştür. Beklendiği gibi lif kullanımı ile aşınmaya karşı dayanıklılık artmıştır. Lif kullanımıyla, KRPC karışımının yükseklik kaybı, yaklaşık %23 oranında, ARPC karışımının yükseklik kaybı ise %16 oranında azalmıştır. ARPC karışımı lifsiz halde KRPC'ye göre yaklaşık %10, lifli halde ise yaklaşık %2 oranında daha az yükseklik kaybı göstermiştir.



Şekil 9.49 ARPC ve KRPC karışımlarında aşınma etkisiyle oluşan yükseklik ve ağırlık kaybı.

### 9.11 Darbe Etkilerine Dayanıklılık

Darbe etkilerine karşı dayanıklılık deneyi, lifsiz ve lifli ARPC ve KRPC karışımları üzerinde ayrıntıları 5.2.13.9’da verilen yöntemle yapılmıştır. Tablo 9.2’de 20 kg ağırlığın 45 cm yükseklikten düşürülmesi sonucunda ilk çatlak oluştuğu darbe sayısı ve nihai darbe dayanıklılığı verilmiştir. Parantez içindeki değerler ise deney yapılan 5 numune için bulunan değişkenlik katsayısı değerleridir.

Lifsiz ARPC karışımlarında 37 darbe sonunda gözle görülebilir ilk çatlak oluşmuştur. Kırılma ise 38 darbe sonunda gerçekleşmiştir. Bununla birlikte KRPC karışımında kırılma şaşırtıcı bir şekilde ilk darbe sonunda meydana gelmiştir.

Lifli KRPC karışımında ilk çatlak 229 darbeye oluşurken, lifli ARPC karışımında ilk çatlak oluşumu 1402 darbe sonunda oluşmuştur. Numunenin ikiye ayrılması ise, lifli KRPC karışımında 1650, lifli ARPC karışımında ise 8027 darbe sonunda olmuştur.

Tablo 9.2 ARPC ve KRPC karışımlarının darbeye dayanıklılık deneyi verileri (düşü yüksekliği 45 cm)

	İlk çatlak dayanıklılığı, darbe sayısı	Nihai dayanıklılık, darbe sayısı	İlk çatlak dayanıklılığı ARPC/KRPC	Nihai dayanıklılık, ARPC/KRPC	İlk çatlak dayanıklılığı, lifli/lifsiz	Nihai dayanıklılık, lifli/lifsiz
KRPC-Lifsiz	1 (%0)*	1 (%0)	--	--	--	--
KRPC-Lifli	229 (%9,5)	1650 (%8,5)	--	--	229	1650
ARPC-Lifsiz	37 (%16,4)	38 (%16,0)	37	38	--	--
ARPC-Lifli	1402 (%9,9)	8027 (%8,8)	6,1	4,9	37,9	211,2

\*parantez içindeki değerler değişkenlik katsayısıdır.

Lifsiz KRPC karışımı ağırlık 45 cm yükseklikten düşürüldüğünde ilk darbe sonunda kırılırken, lifsiz ARPC karışımı 38 darbe sonunda kırılmıştır. Buradan hareketle ARPC karışımının KRPC karışımına kıyasla darbe etkilerine 38 kat daha dayanıklı olduğunu söylemek yanlış olacaktır. Esasen, bu değer 38 kattan daha fazladır. Çünkü KRPC karışımını parçalamak için gerekli olan enerji 20 kg ağırlığı 45 cm'den düşürülerek uygulanan enerjiden daha düşüktür. Bu nedenle, lifsiz ARPC ve KRPC karışımları 20 kg ağırlığı 20 cm yükseklikten düşürülerek deneye tabi tutulmuştur. ARPC karışımı 1856 darbe sonunda kırılırken, KRPC karışımı 2 darbe sonunda kırılmıştır (Tablo 9.3).

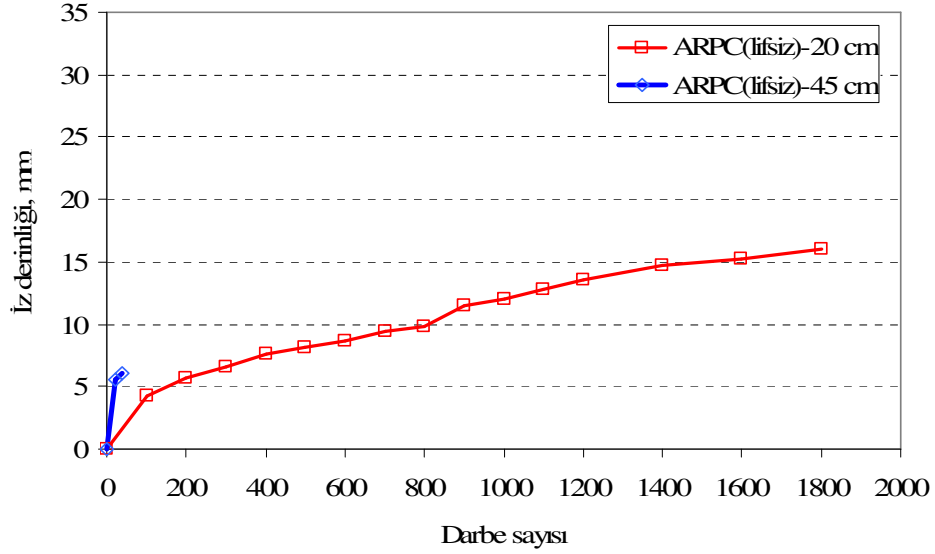
Tablo 9.3 ARPC ve KRPC karışımlarının darbeye dayanıklılık deney verileri (düşü yüksekliği 20 cm)

	İlk çatlak dayanıklılığı, darbe sayısı	Nihai dayanıklılık, darbe sayısı	İlk çatlak dayanıklılığı ARPC/KRPC	Nihai dayanıklılık, ARPC/KRPC
KRPC-Lifsiz	2 (%0)*	2 (%0)*	--	--
ARPC-Lifsiz	1855 (%14,2)	1856 (%14,2)	927,5	928

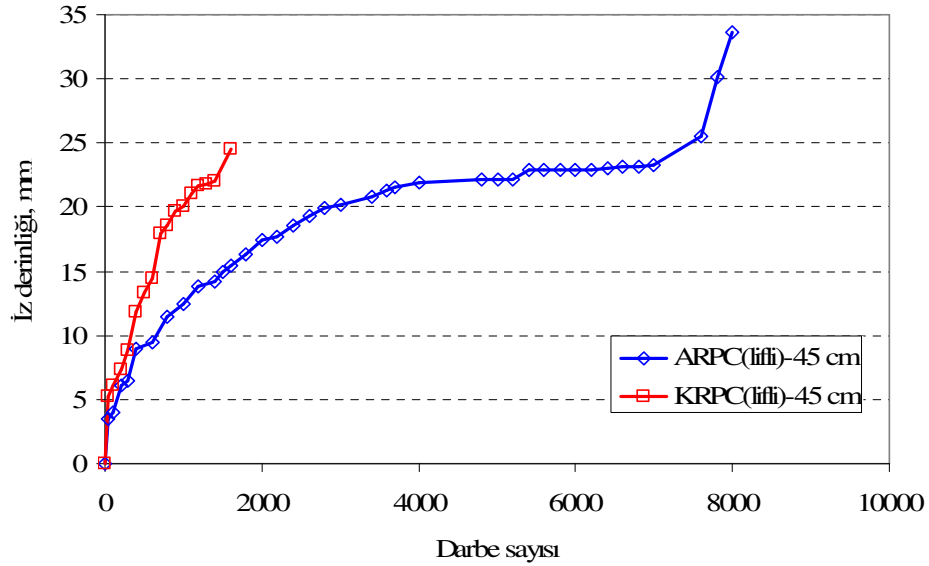
\*parantez içindeki değerler değişkenlik katsayısıdır.

Numuneler kırılana kadar oluşan iz derinliğinin darbe sayısına bağlı olarak değişimi lifsiz ARPC karışımı için Şekil 9.50'de, lifli karışımlar için ise Şekil 9.51'de verilmiştir. Düşme yüksekliği arttıkça örnek daha düşük darbe sayısında ve daha az iz derinliği oluşturarak kırılmaktadır. Düşme yüksekliğinin 20 cm'den 45 cm'ye çıkarılmasıyla kırılma esnasında oluşan iz derinliği yaklaşık olarak 2/3 oranında azalmıştır (Şekil 9.50). Lifli ARPC karışımında kırılma anında oluşan iz derinliğinin KRPC karışımına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Kırılma esnasında bu örneklerde oluşan kesit kaybı numune yüksekliğinin neredeyse yarısıdır. Bu durum bu karışımların darbe etkilerine ne kadar dayanıklı olduğunun bir

kanıtıdır. Bu numunelerde oluşan kırılmaya, darbe etkisiyle uzun zamanda oluşan aşınmanın yarattığı kesit kaybının etkisi büyüktür.



Şekil 9.50 Lifsiz ARPC karışımlarında darbe sayısına bağlı olarak iz derinliğinin değişimi.



Şekil 9.51 Lifli ARPC ve KRPC karışımlarında darbe sayısına bağlı olarak iz derinliğinin değişimi.

KRPC karışımı ile benzer mekanik özelliklere sahip olmasına rağmen ARPC karışımının mükemmel darbe dayanıklılığı, Şekil 8.20, Şekil 8.29 ve Şekil 8.33'ten görüleceği gibi, matris fazı içerisine dağılmış çok sayıdaki nanometre boyutundaki



boşluklardan kaynaklanmaktadır. Bu boşlukların amortisör görevi görerek darbe nedeniyle oluşan enerjiyi sönümlediği düşünülmektedir. Ayrıca, ARPC'nin KRPC'ye kıyasla elastisite modülünün daha düşük, kırılma enerjisinin ise daha yüksek seviyede olmasının da yüksek darbe dayanıklılığına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

### 9.12 Yüksek Sıcaklıklara Dayanıklılık

Lifli ARPC ve KRPC karışımları yüksek sıcaklık fırınında 200, 300, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa 10 °C/dak hızla ısıtılmış ve ilgili sıcaklığa 3 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Deney sonrasında fırından çıkarılan numuneler atmosfer koşullarında soğutulmuş ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Deney yöntemi ile ilgili ayrıntılı açıklama Bölüm 5.2.13.10'da verilmiştir.

Üç saat süreyle 200 ve 300 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda numunelerde parçalanmaya neden olan herhangi bir hasar oluşmamıştır. Bununla birlikte, 400 °C sıcaklığa uzun süreli maruz kalma durumunda KRPC karışımında hasar oluşumları başlamıştır. Deney öncesi yüksek sıcaklık fırınındaki numune pozisyonları Şekil 9.52a'da verilmiştir. Sıcaklık 400 °C'ye ulaştığında numunelerde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Bununla birlikte, 400 °C sıcaklıkta 18 dakikada bekleme sonunda KRPC karışımları patlayarak parçalanmıştır (Şekil 9.52b). Patlamalar 1 saate kadar devam etmiş (Şekil 9.52c), 1 saatten sonra patlama gerçekleşmemiştir (Şekil 9.52d).

Şekil 9.53'te 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin, sıcaklık 600 °C'ye ulaşana kadar görsel değişimleri görülmektedir. KRPC karışımında 445 °C sıcaklıkta köşelerden lokal parça kayıpları başlamıştır. Sıcaklık 450 °C'ye ulaştığında parça kayıpları artmıştır. Şekil 9.53a'da sıcaklık 490 °C'ye ulaştığında numunelerdeki parçalanma durumu görülmektedir. Sıcaklık 500 °C'yi aştığında gürültü oluşturan bir patlama oluşmamıştır. Sıcaklık 520 °C'ye ulaşıldığında numunelerin görünümü Şekil 9.53b'de verilmiştir. Numuneler soğuduktan sonraki görünümleri ise Şekil 9.54'te verilmiştir. KRPC karışımında sıcaklık artışı ile oluşan patlamanın sebebi, bu karışımın çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olması ve yapısında silis

dumanı içermesi nedeniyle geçirimsizliğinin oldukça yüksek olmasıdır. Hertz (1992), yüksek nem içeriklerinde ortaya çıkan dökülmeden dolayı silis dumanı içeriğini %10 olarak sınırlamıştır. Daha fazla oranda kullanımın, yoğun çimento hamurlarında boşluk basınçlarının artmasından dolayı patlayarak kırılma riskini arttırdığı belirtilmiştir. ARPC karışımı ise, KRPC ile aynı oranda silis dumanı içermesine ve su/bağlayıcı oranı KRPC ile aynı olmasına rağmen patlayarak parçalanma davranışı göstermemiştir. Bu durum, Şekil 8.20, Şekil 8.29 ve Şekil 8.33'ten görüleceği gibi, matris fazı içerisine dağılmış çok sayıdaki nanometre boyutundaki boşluklardan kaynaklanmaktadır. Bu boşluklar, numune içerisinden buharlaşmaya çalışan suyun yarattığı içsel gerilmeleri sönmüleyerek numunenin patlamasını engellemektedir. ARPC'nin daha kaba boşluk yapısı da (Şekil 8.48) suyun buharlaşmasını kolaylaştırarak bu etkinin oluşmasını engellemektedir.



a) Deney öncesi numune pozisyonları



b) 400 °C - 18. dakika

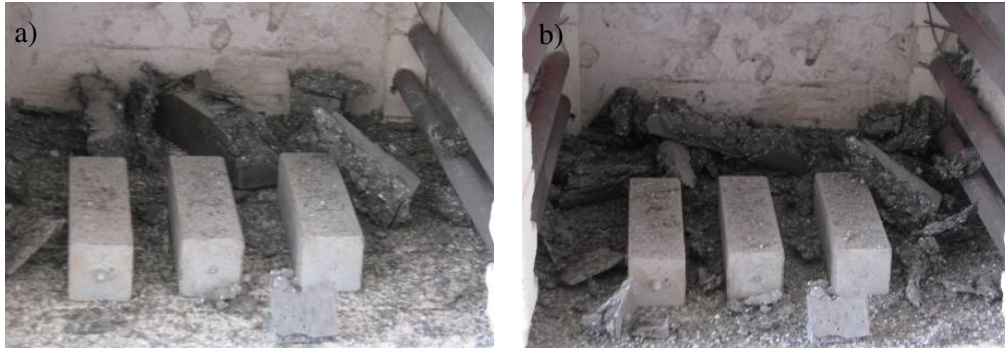


c) 400 °C - 1. saat.

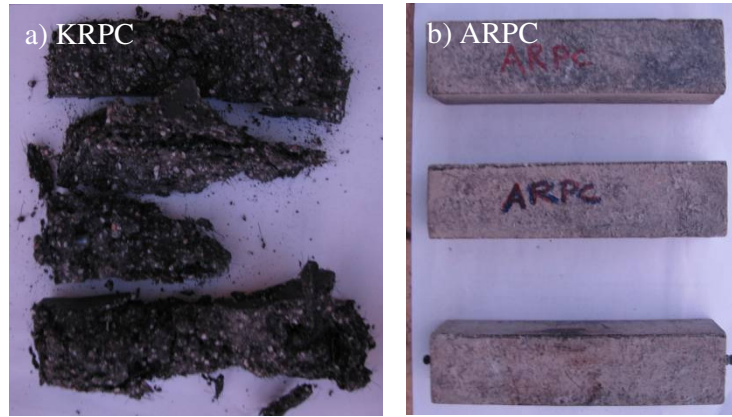


d) 400 °C - 2. ve 3. saat.

Şekil 9.52 400 °C sıcaklıkta zamana bağlı olarak numune görüntüleri.

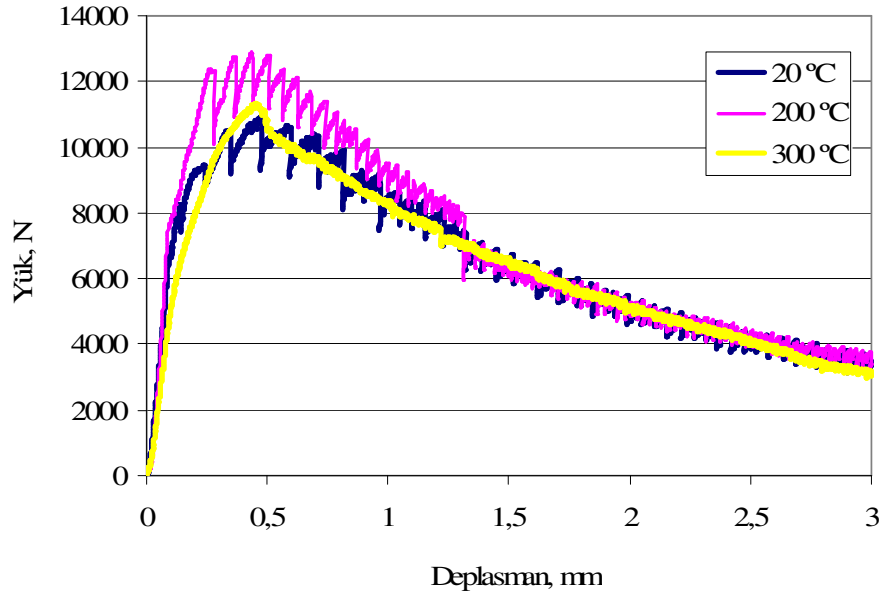


Şekil 9.53 600 °C sıcaklığa ulaşana kadar sıcaklığa bağlı numune görüntüleri a) 490 °C, b) 520 °C.



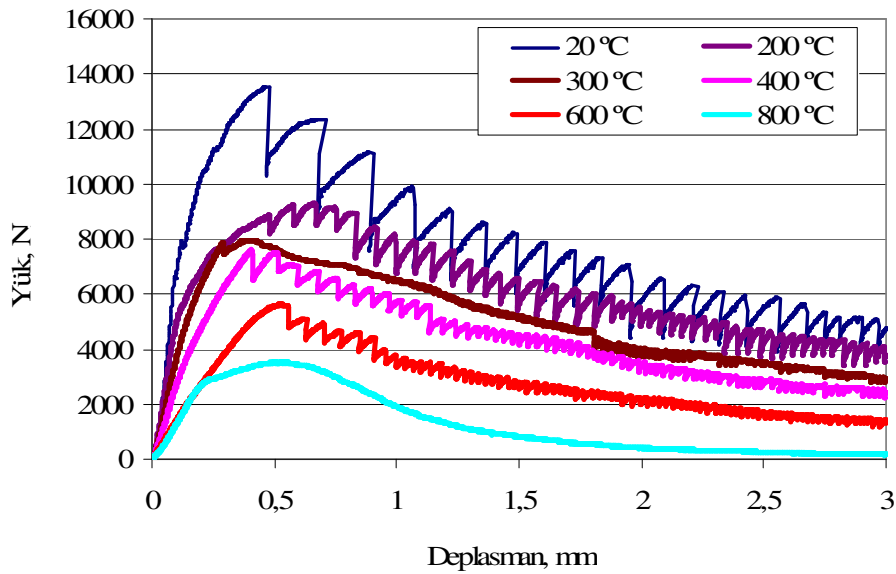
Şekil 9.54 3 saat 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra soğumuş halde numune görüntüleri.

Şekil 9.55'te sıcaklığın seviyesine bağlı olarak KRPC karışımının yük-deplasman eğrileri verilmiştir. Sıcaklığın 200 °C'ye çıkması lif-matris aderansını önemli derecede etkilemeden, maksimum yük seviyesini daha yukarı bir seviyeye çıkarmıştır. Sıcaklığın 300 °C'ye çıkmasıyla ise, lif-matris aderansı önemli ölçüde azalmış ancak maksimum yük seviyesi artmıştır. Bu sıcaklıkta eğrinin başlangıç kısmının eğiminin, bir başka deyişle, elastisite modülünün bir miktar azaldığı görülmektedir.



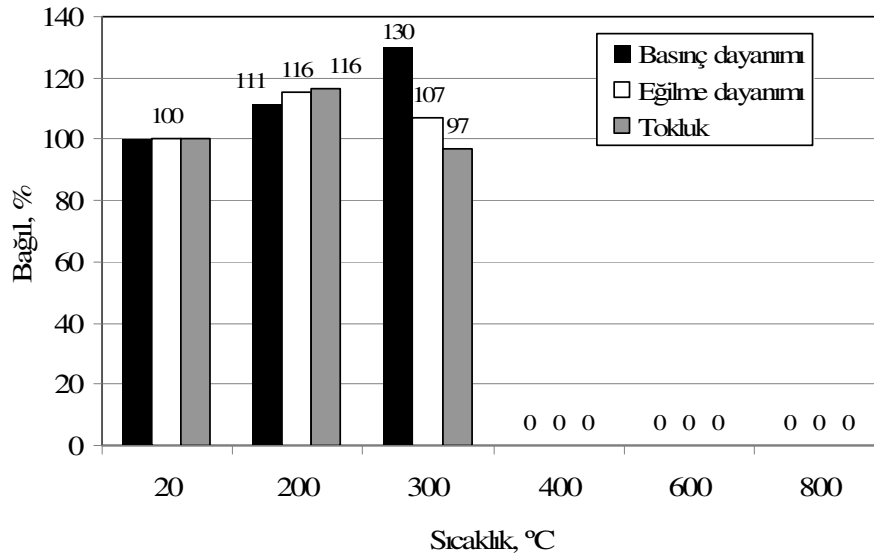
Şekil 9.55 KRPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

Şekil 9.56’da ARPC karışımlarının yük-deplasman eğrilerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. KRPC karışımından farklı olarak, sıcaklığın artışı ile eğilme etkisinde maksimum yük seviyesi sürekli olarak düşmüştür. Lif aderansında sıcaklığın artışıyla oluşan azalma dikkati çekmektedir. Ayrıca artan sıcaklıkla elastisite modülü de azalmıştır.



Şekil 9.56 ARPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak yük-deplasman eğrileri.

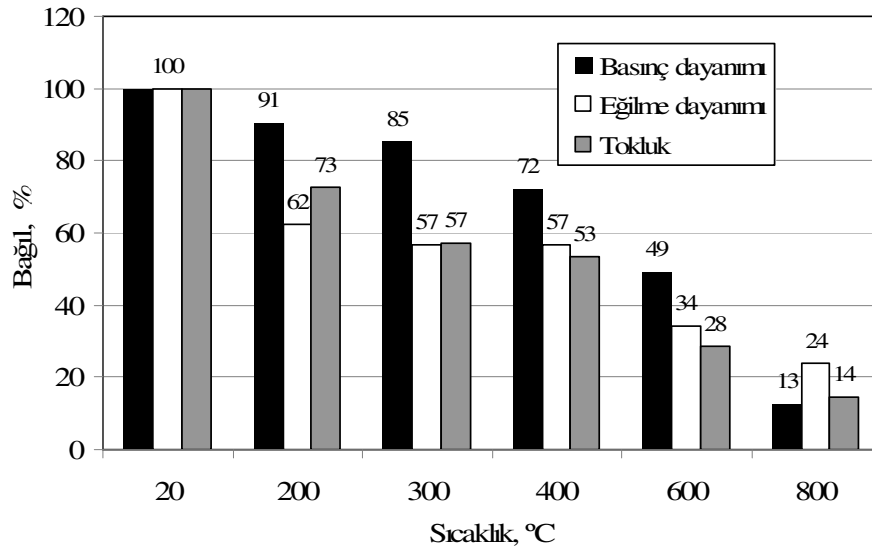
Şekil 9.57’de KRPC karışımının mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi verilmiştir. 200 °C’ye kadar, tüm mekanik özelliklerin geliştiği görülmektedir. Sıcaklık 300 °C’ye yükseldiğinde tokluk bir miktar azalmıştır. Eğilme ve basınç dayanımı ise artmıştır. Bu sıcaklık seviyelerinde dayanımda oluşan artış, adsorbe suyun uzaklaşması sonucunda van der Waals kuvvetlerinin güçlenmesiyle alakalıdır.



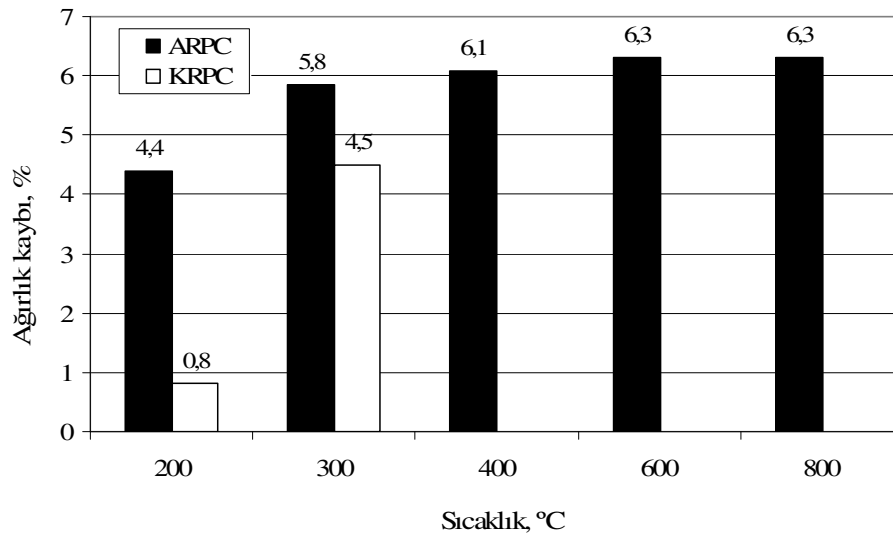
Şekil 9.57 KRPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak bağlı mekanik özelliklerinin değişimi.

Şekil 9.58’de ARPC karışımının mekanik özelliklerinin değişimi verilmiştir. Tüm mekanik özellikler sıcaklığın artması ile sürekli olarak azalmıştır. Yüksek sıcaklıktan en fazla etkilenen mekanik özelliğin genellikle tokluk, en az etkilenen mekanik özelliğin ise basınç dayanımı olduğu görülmüştür.

Ağırlık ölçümleri, 3 saat süreyle 400 °C sıcaklığa maruz bırakılan ARPC karışımlarının %6,1 oranında, 600 ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ise %6,3 oranında ağırlık kaybına uğradıklarını göstermiştir. KRPC karışımının ağırlık kaybının deney yapılabilen sıcaklıklarda ARPC karışımına kıyasla nispeten daha düşük seviyede olduğu görülmektedir (Şekil 9.59).



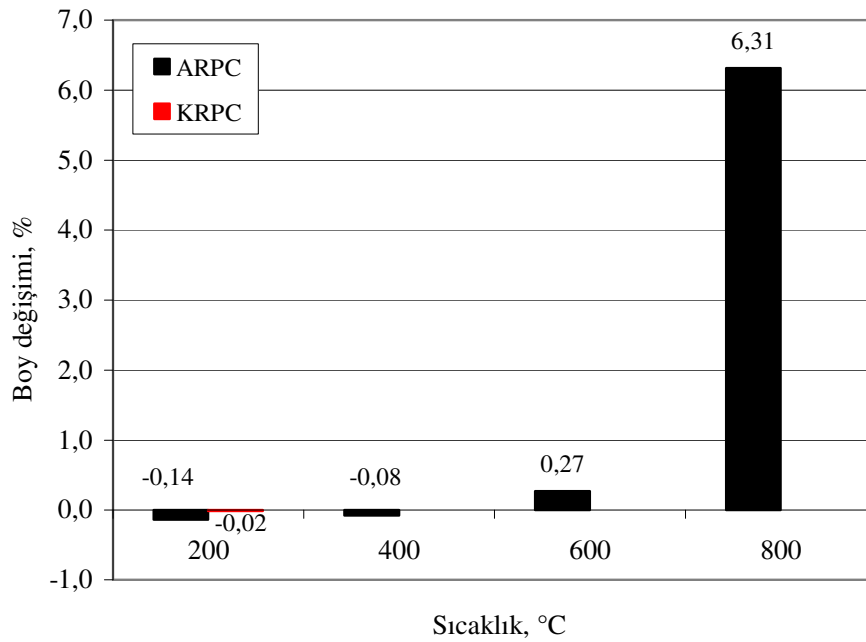
Şekil 9.58 ARPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak bağıl mekanik özelliklerinin değişimi.



Şekil 9.59 ARPC ve KRPC karışımlarının sıcaklığa bağlı olarak ağırlık kaybı.

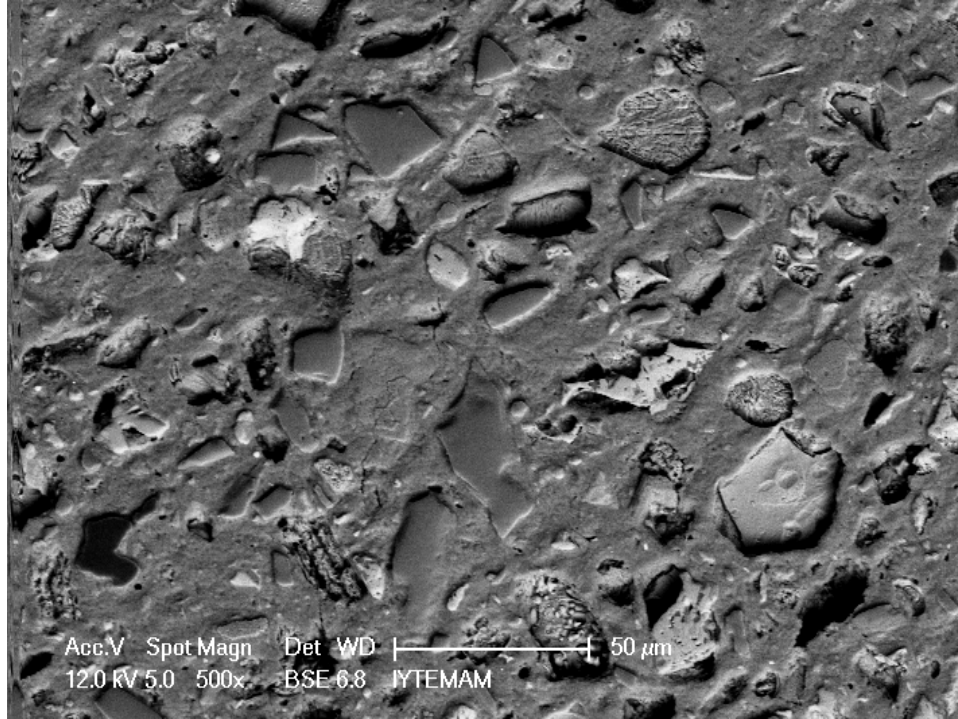
Boy ölçümleri (Şekil 9.60), ARPC'nin 200 ve 400 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda düşük miktarda (%0,08-0,14) büzüldüğünü göstermiştir. Bununla birlikte, 600 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda %0,27 oranında, 800 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda ise %6,31 oranında genişlemiştir. Bu durum karışımlarda agrega olarak kullanılan kuvarsın varlığı ile ilgilidir. Kuvars açısından zengin kayalar sıcaklığın artışı ile sürekli olarak genişir. Ancak, daha fazla önemli olan değişiklik

573 °C'de %0,85 ani hacim değişikliği ile sonuçlanan,  $\alpha$  kuvarsın  $\beta$  kuvarsa dönüşümüdür. Bununla birlikte 800 °C sıcaklıkta oluşan oldukça büyük miktardaki genleşmenin sadece agrega kaynaklı olmadığı, agregasız olarak hamur fazından hazırlanan örneklerin 800 °C sıcaklığa maruz bırakılması yoluyla yapılan deneyde de görülmüştür. Beklenenin aksine ARPC karışımının bağlayıcı hamurunun harçtan çok daha fazla genleştiği (%14,6 oranında) görülmüştür. KRPC karışımının ise, 200 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda ARPC'den daha az oranda da olsa büzüldüğü görülmüştür.



Şekil 9.60 ARPC ve KRPC karışımlarının sıcaklığa bağlı olarak boy değişimi.

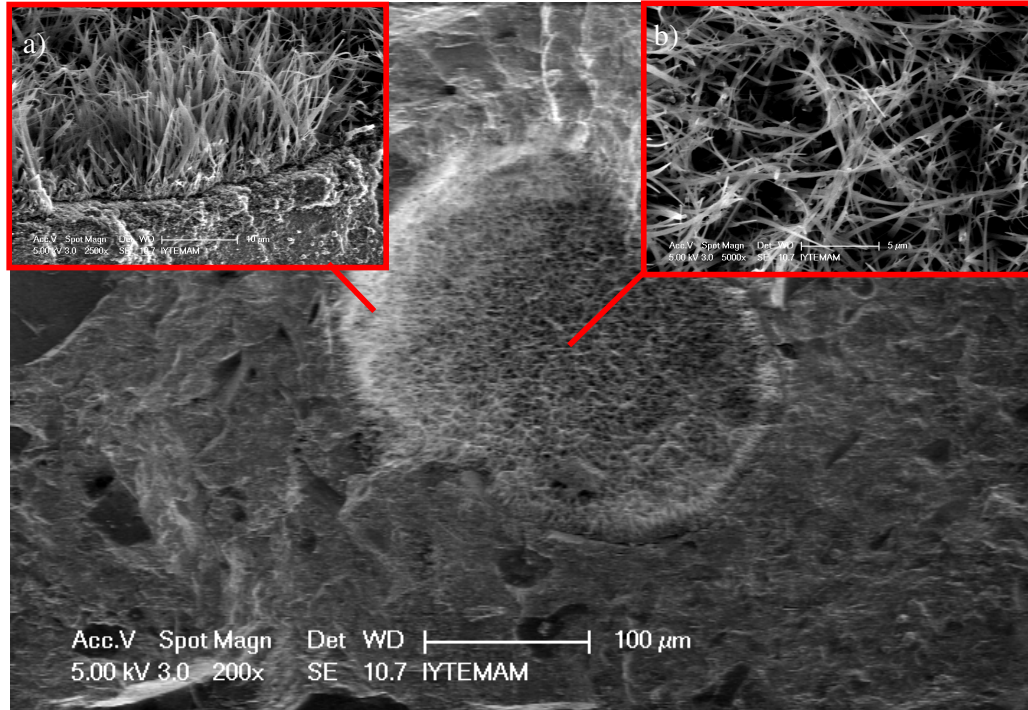
Şekil 9.61'de KRPC karışımının 300 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.34 ile karşılaştırıldığında kılcal çatlakların ortadan kalktığı açıkça görülmektedir. Bu durum, sıcaklık etkisiyle numunenin hidratasyonun devam ettiğini (serbest suyun mevcut olduğu sıcaklıklara kadar) ve mevcut çatlakların numunenin içerdiği nem ve sıcaklık etkisi ile iyileştiğini göstermektedir.



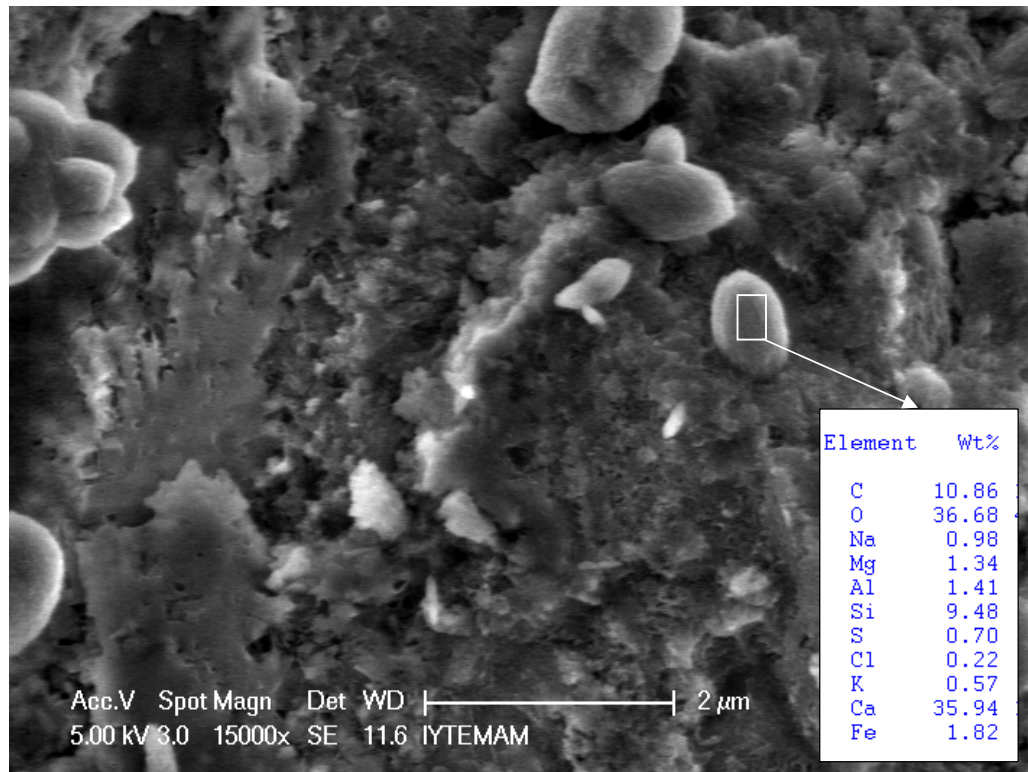
Şekil 9.61 300 °C sıcaklığa maruz kalmış KRPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü - 500x.

Yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce boş olan boşlukların içinde, 300 °C sonrasında Ca/Si oranı 1 olan tobermorit jelinin oluştuğu görülmüştür (Şekil 9.62). Agregat - hamur ara yüzeyinin hala oldukça kuvvetli olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisinden önce var olan kristallerin (Şekil 8.25) miktarı, 300 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra oldukça azalmıştır (Şekil 9.63). Bu yapı üzerinde yapılan EDS analizi, Ca/Si oranının 3,8 olduğunu ve yüksek oranda karbon içerdiğini göstermiştir.



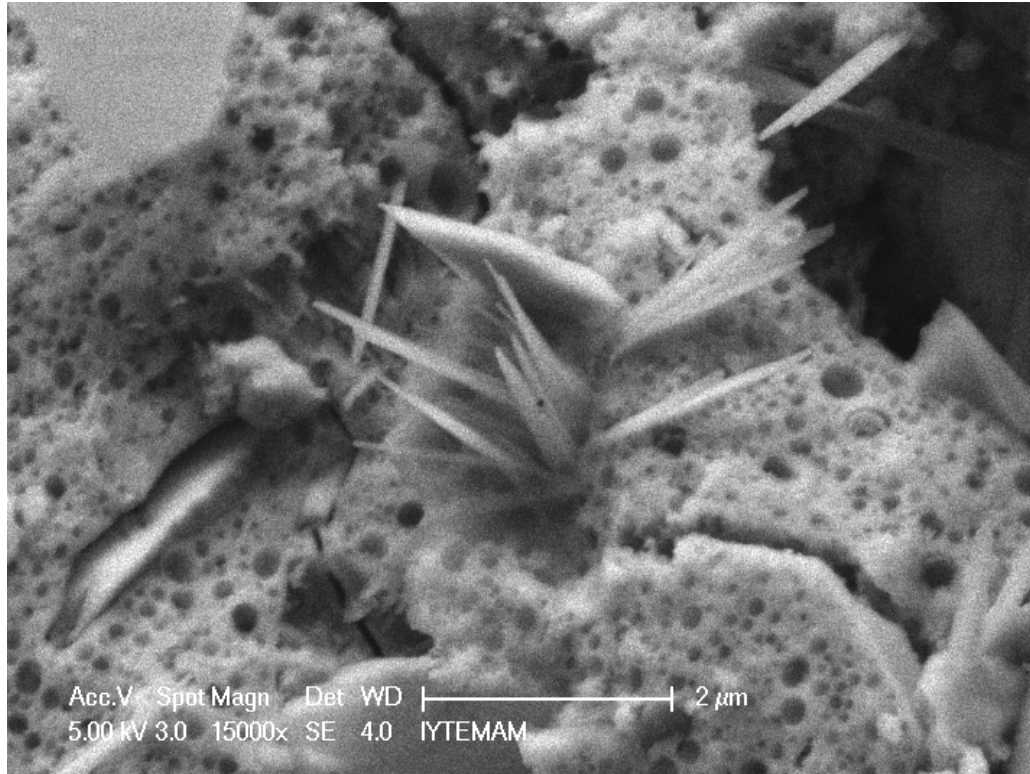


Şekil 9.62 300 °C sıcaklığa maruz kalmış KRPC karışımı SEM (SE) görüntüsü - 200x, a) Boşluk kenarı - 2500x, b) boşluk merkezi - 5000x.



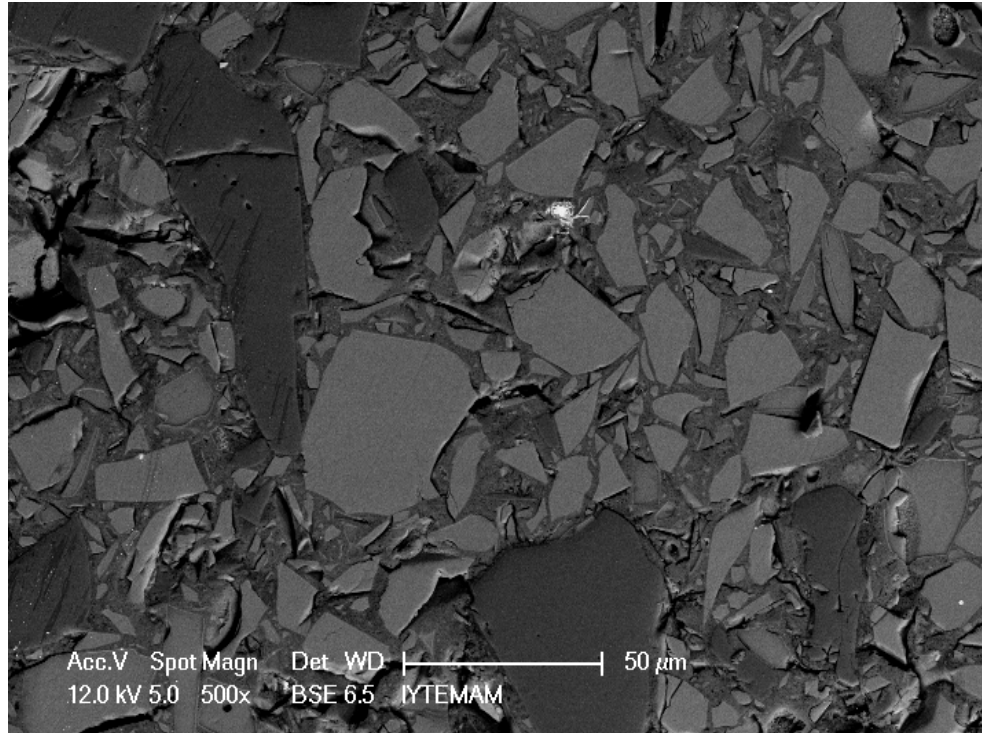
Şekil 9.63 300 °C sıcaklığa maruz kalmış KRPC karışımı matrisi SEM (SE) görüntüsü ve EDS analizi.

Şekil 9.64'te 200 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımının matrisi görülmektedir. Boşlukların içi ve agrega-matris ara yüzeyi de dahil olmak üzere matrisin çok büyük bir kısmında beyaz renkli iğneciklerin olduğu görülmüştür. Bu yapı Ca ve Si elementlerinden oluşmakta olup, farklı iki noktada yapılan EDS analizi Ca/Si oranının (0,44 ve 0,28) oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Dayanımdaki azalmadan genişerek gerilme oluşturan bu oluşumların sorumlu olduğu düşünülmektedir.

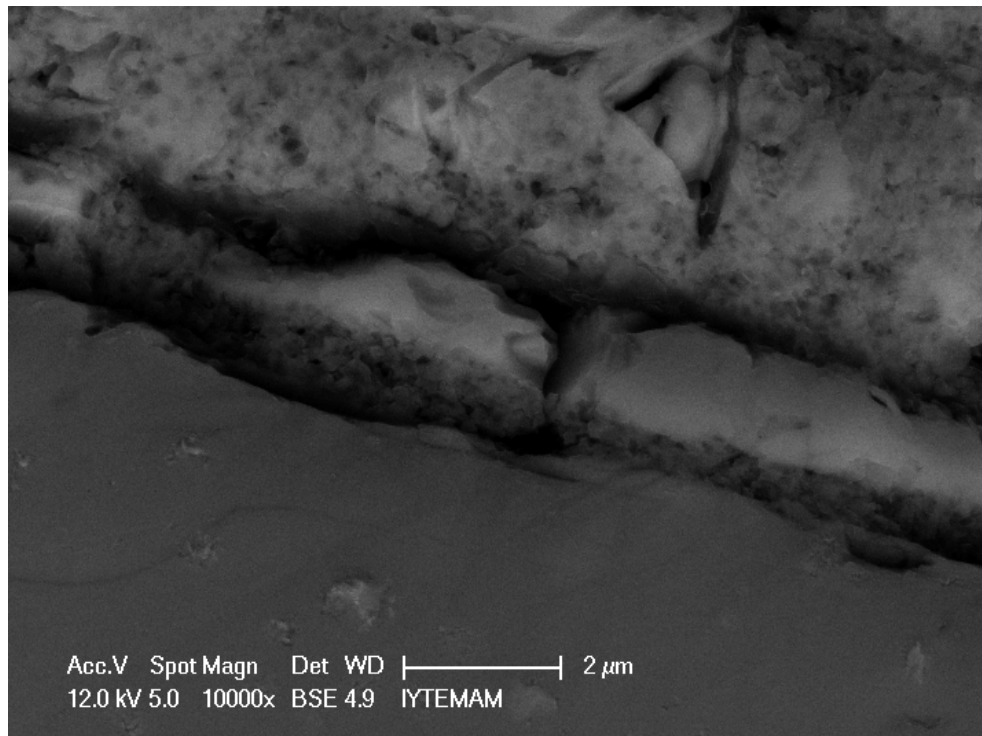


Şekil 9.64 200 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımı matrisi SEM (SE) görüntüsü.

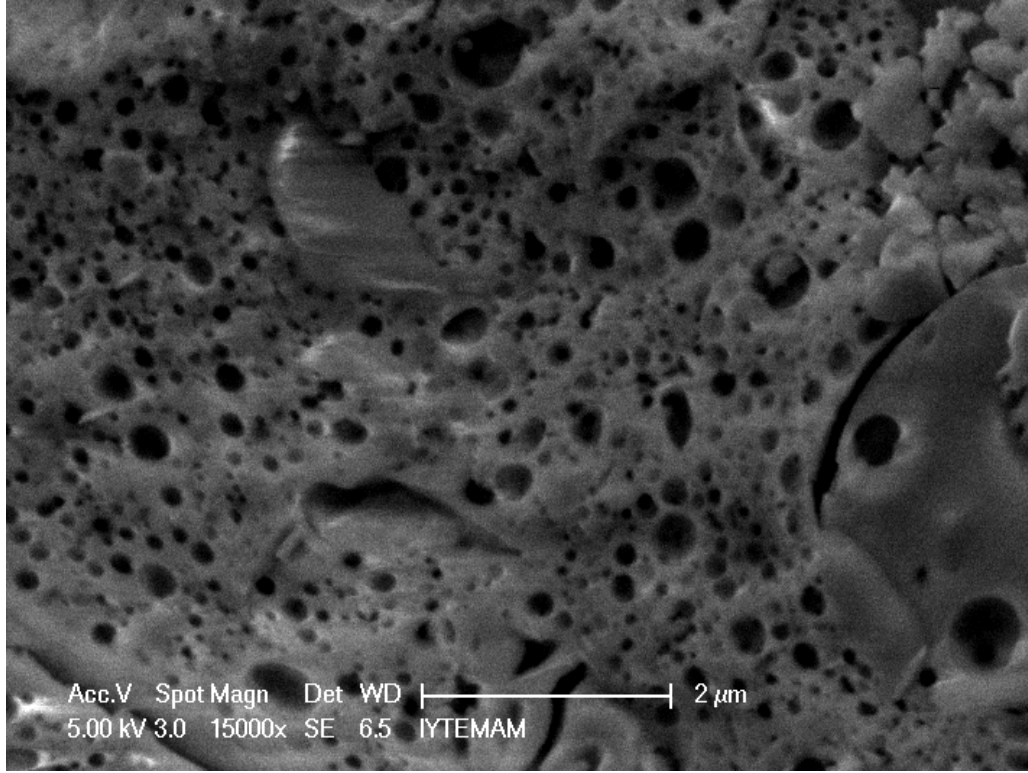
Şekil 9.65'te 600 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.28 ile kıyaslandığında çatlakların önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Agrega-matris ara yüzeyi (Şekil 9.66) ve hidrate olmamış YFC taneleri-matris arasındaki ara yüzeyin oldukça hasar gördüğü görülmektedir (bk. Şekil 8.32). Bazı kuvars agregaları yüksek sıcaklık etkisiyle çatlamıştır (Şekil 9.65). Lif-matris ara yüzeyi de hasar görmüştür. 200 °C sıcaklıkta oluşan beyaz renkli iğnecikler 600 °C sıcaklıkta kaybolmuştur (Şekil 9.67).



Şekil 9.65 600 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımı matrisi SEM (BSE) görüntüsü.

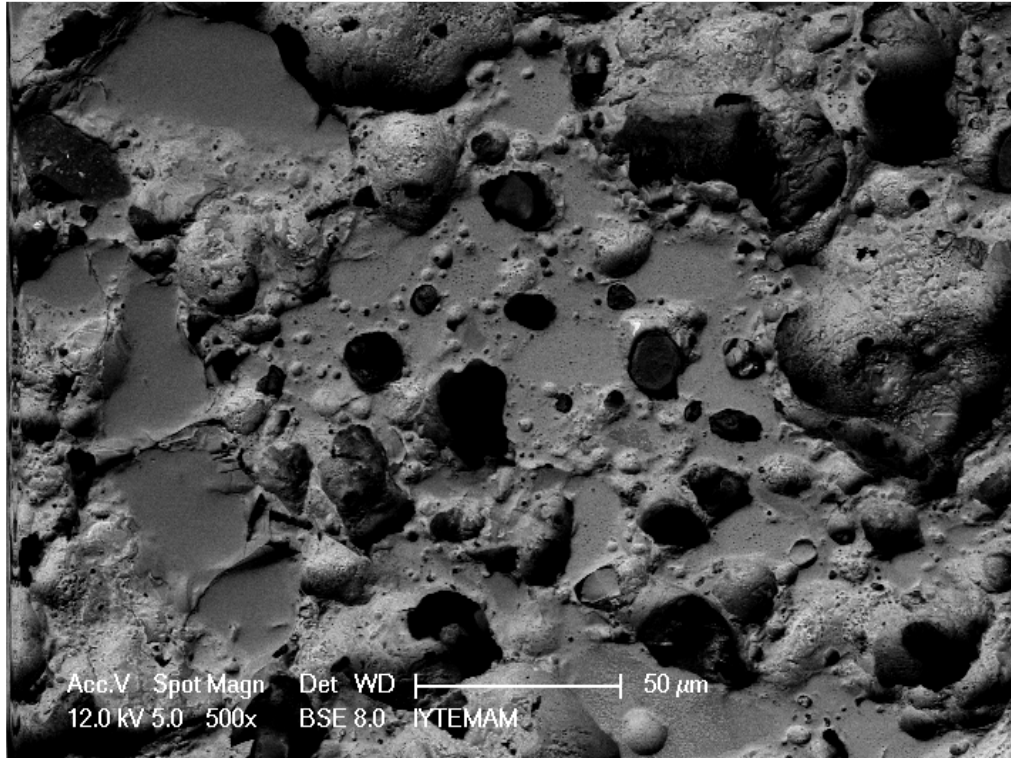


Şekil 9.66 600 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımı agrega-matris ara yüzeyi SEM (BSE) görüntüsü.

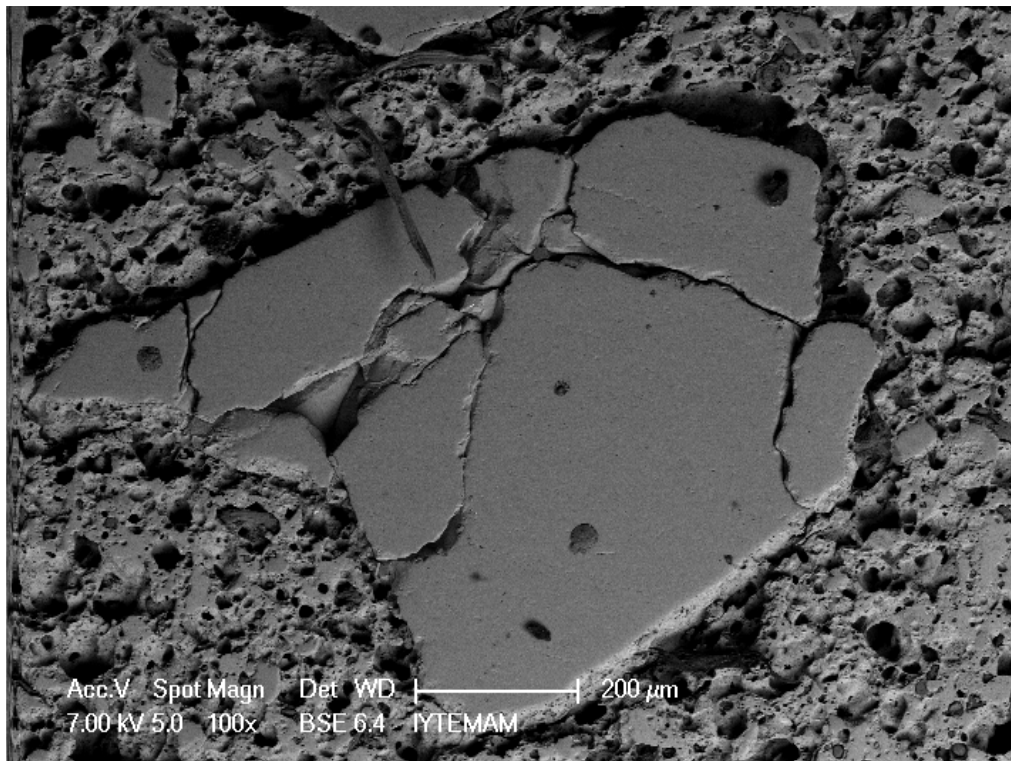


Şekil 9.67 600 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımı matrisi SEM (SE) görüntüsü.

Şekil 9.68’de 800 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC karışımının SEM (BSE) görüntüsü verilmiştir. Şekil 8.28 ile kıyaslandığında hidrate olmamış YFC tanelerinin matris fazından ayırt edilemediği ve önemli miktarda oldukça büyük çaplı boşluğun olduğu görülmektedir. Kuvars agregaları bu sıcaklıkta önemli ölçüde hasar görmüştür (Şekil 9.69).

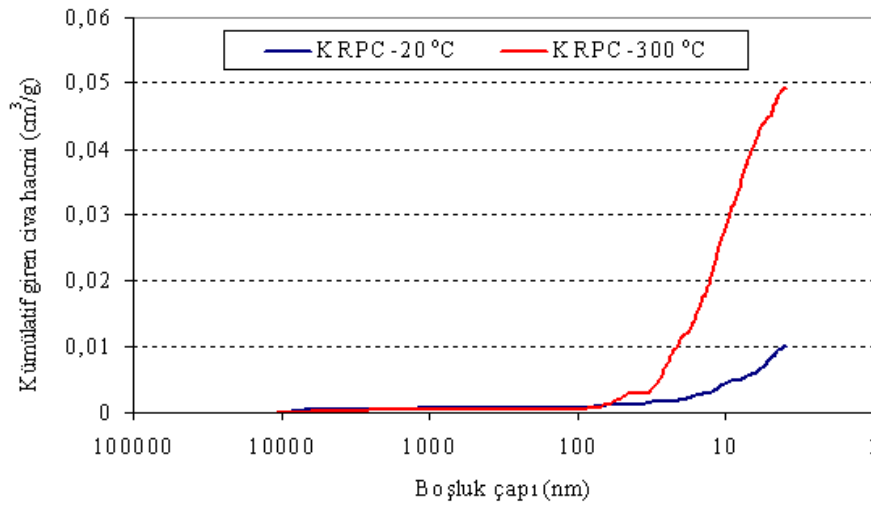


Şekil 9.68 800 °C sıcaklığa maruz kalmış ARPC matrisi SEM (BSE) görüntüsü.



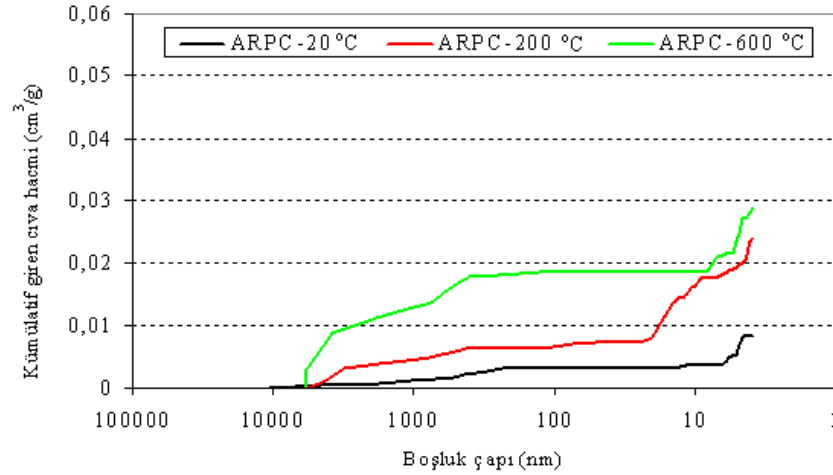
Şekil 9.69 800 °C sıcaklığa maruz kalmış kuvars agregası SEM (BSE) görüntüsü.

Şekil 9.70'te KRPC karışımı için sıcaklığa bağlı olarak boşluk boyut dağılımı sunulmuştur. Mezo boşlukların hacminin 300 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda önemli derecede arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, dayanımı etkileyen boşlukların (>100 nm) sıcaklığa maruz kalmadan önce oldukça düşük düzeyde olduğu ve 300 °C sıcaklığa maruz kalma sonunda miktarında herhangi bir değişimin oluşmadığı görülmektedir. Bu sıcaklığa maruz kalma sonunda dayanımın arttığı göz önünde bulundurulursa, cıva porozimetresi deneyi sonuçlarının mekanik deney sonuçlarını doğruladığı söylenebilir.



Şekil 9.70 KRPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak boşluk boyutu dağılımı.

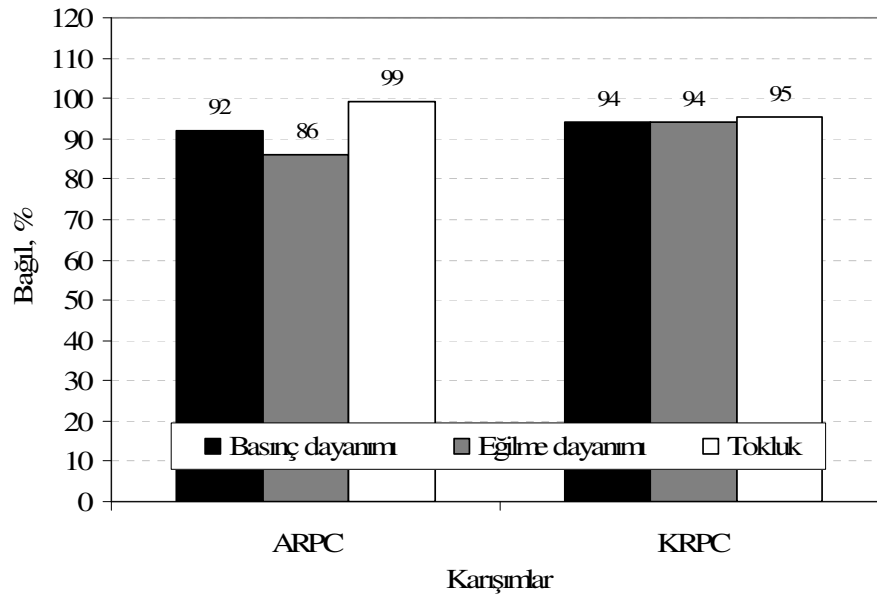
Şekil 9.71'de ARPC karışımı için sıcaklığa bağlı olarak boşluk boyutu dağılımı verilmiştir. Sıcaklıktaki artışla boşluk boyutunun önemli derecede büyüdüğü görülmüştür. ARPC karışımının mekanik özelliklerinin de sıcaklıktaki artışla sürekli olarak azaldığı düşünülürse, mikroyapıdaki değişimin yanı sıra boşluk boyut dağılımındaki değişimin de mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği söylenebilir.



Şekil 9.71 ARPC karışımının sıcaklığa bağlı olarak boşluk boyutu dağılımı.

### 9.13 Donma-Çözülme Etkilerine Dayanıklılık

Karışımların donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığı, ayrıntıları Bölüm 5.2.13.11’de verilen yöntemle göre belirlenmiştir. Deneyler, 150 donma-çözülme çevrimine maruz bırakılan ARPC ve KRPC karışımlarının mekanik özelliklerindeki değişimin oldukça düşük düzeyde olduğunu göstermiştir (Şekil 9.72).



Şekil 9.72 150 çevrim donma-çözülme etkisine maruz kalmış ARPC ve KRPC karışımlarının mekanik özelliklerindeki değişim.

Donma-çözülme etkilerine karşı KRPC karışımının iyi performansı düşük geçirimsizliğine, ARPC karışımı için ise Şekil 8.20, Şekil 8.29 ve Şekil 8.33'ten görüleceği gibi, matris fazı içerisine dağılmış çok sayıda nanometre boyutundaki boşluklara bağlanmıştır. Bu boşluklar, sürüklenmiş hava kabarcıkları gibi davranarak, donarak içsel gerilme oluşumuna yol açacak suya kaçabilecek alanlar yaratmakta ve hasar oluşumunu azaltmaktadır. ARPC'nin donma-çözülme etkilerine karşı dayanıklılığını arttıran diğer etken ise, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen bağlayıcıların boşluk çözültisinin donma noktasının daha düşük olmasıdır (Shi, Krivenko ve Roy, 2006).

#### **9.14 Dördüncü Aşama Deneylelerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi**

ARPC karışımının kapiler su emme, toplam su emme ve geçirimli boşluk miktarının KRPC karışımına kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sekizinci bölümde sonuçları verilen cıva porozimetresi verileri de bu bulguyu doğrulamıştır. KRPC karışımının geçirimsizliğinin daha yüksek seviyede olması birçok durabilite probleminde bu karışımı avantajlı duruma geçirmektedir. Bununla birlikte, dış etkilere karşı dayanıklılıkta önemli olan bir diğer faktör kimyasal kompozisyon ve morfolojik yapıdır. ARPC karışımının yapısını oluşturan C-S-H'nin Ca/Si oranı KRPC karışımından daha düşüktür. Bu yapı birçok kimyasal etki karşısında, özellikle asit etkisinde, daha kararlı bir yapı olmasından dolayı avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, ARPC karışımının  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içermemesi, sülfat etkisi, yüksek sıcaklık etkisi gibi etkiler altında bu karışımın performansını olumlu yönde etkileyici faktörlerdir. Matris morfoloji açısından bakıldığında, ARPC karışımının nanometre boyutundaki çok sayıda boşluktan oluşan matrisi, darbe, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme etkilerinde mükemmel performans elde edilmesini sağlamaktadır. KRPC karışımının boşluksuz yapısı ise donma-çözülme dayanıklılığı bakımından avantaj iken, darbe ve yüksek sıcaklık etkilerinde dezavantaj olmaktadır. Bu genel değerlendirmenin ardından ARPC ve KRPC karışımlarının incelenen durabilite etkileri karşısındaki davranışları aşağıda özetlenmiştir.

ARPC ve KRPC karışımlarının sülfatlı çözültilere ve sülfürik aside dayanıklılığının mekanik özellikler açısından benzer olduğu görülmüştür. Bununla



birlikte, görsel bozulmalar açısından değerlendirildiğinde, KRPC karışımının yüzeyindeki hasarın ARPC karışımına kıyasla birçok durumda daha fazla olduğu düşünüldüğünde, ARPC karışımını bu etkilere maruz kalma durumunda daha tercih edilebilir bir karışım haline getirmektedir.

Alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen bağlayıcıların potansiyel problemlerinden olan alkali-silika reaksiyonu genişmesi ve çiçeklenme sorunu ARPC ve KRPC karışımlarında görülmemiştir. Bu durum, çözünme deneyi verilerinden de görüleceği üzere, alkalilerin çoğunun matris yapısına bağlanması ile ilgilidir. KRPC karışımında alkali-silika reaksiyonun görülmemesi ise, bu karışımın yüksek dereceden geçirimsizliğine bağlanabilir.

Karbonatlaşma tehlikesinin deneye tabi tutulan her iki karışım için de söz konusu olmadığı görülmüştür.

Klorür korozyonu riskinin bulunduğu durumlarda, KRPC karışımının kullanımı ARPC'ye kıyasla çok daha uygundur.

Aşınma etkilerine dayanıklılık bakımından her iki karışım da yüksek dayanıklılık göstermesine karşın, ARPC karışımının KRPC karışımına kıyasla bir miktar daha iyi davrandığı görülmüştür.

Darbe ve yüksek sıcaklık etkileri söz konusu olduğunda, ARPC karışımı KRPC karışımına kıyasla çok üstün performans sergilemiştir. Bu durum ARPC karışımının matris fazı içerisine dağılmış çok sayıda boşluktan kaynaklanmaktadır. Bu boşluklar darbe etkilerinde enerjiyi sönümleyerek, yüksek sıcaklık etkilerinde ise buharlaşmaya çalışan suyun yarattığı içsel gerilmeleri önleyerek mükemmel performans elde edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, ARPC karışımının darbe etkilerinin söz konusu olduğu, havaalanı meydanları, köprü korkulukları gibi yapılarda ve yüksek sıcaklık etkisine maruz yapı elemanlarında kullanımı oldukça uygundur.

## BÖLÜM ON

### GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, Portland çimentosu kullanılmadan yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktivasyonunu ile yüksek performanslı bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma programı ana hatlarıyla dört aşamaya ayrılabilir. İlk iki aşama, RPC kalitesinde bir kompozit üretimine yönelik olup, amaç ürün özelliklerini geliştirmektir. Üçüncü ve dördüncü aşamada geliştirilen RPC karışımının (ARPC) ve kıyaslama amacıyla kullanılan klasik Portland çimentolu RPC karışımının (KRPC) reolojik, mekanik, içyapı vb. özellikleri ve çeşitli dış etkilere karşı dayanıklılığı incelenerek, geliştirilen kompozitin olumlu ve olumsuz yönleri ortaya konulmuştur.

Birinci aşama deneylerde, farklı kür şartlarında (standart su kürü, buhar kürü ve otoklav kürü) mekanik özellikler, kuruma büzülmesi, işlenebilirlik, priz süresi, su emme karakteristikleri ve içyapı özellikleri de göz önünde bulundurularak, yüksek fırın cürufunun aktivasyonu için en uygun aktivatör karışımları belirlenmiştir. Bu aşamada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- İşlenebilirlik ve priz süreleri bakımından; %6 ve %8 Na<sub>2</sub>O oranlarında ara M<sub>s</sub> (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı) değerlerinin (0,4 ve 0,8) hızlı işlenebilirlik kaybı ve düşük priz süreleri nedeniyle şantiye koşulları için uygun olmayacağı görülmüştür.
- Standart su kürü durumunda;
  - i. Alkalilerle aktive edilmiş harçların mekanik özelliklerinin erken yaşlarda (ilk 7 gün) Portland çimentosu harçlarına kıyasla daha düşük, ileriki yaşlarda ise daha yüksek olduğu görülmüştür.
  - ii. Suda çözünen %2 Na<sub>2</sub>O serisi tüm M<sub>s</sub> oranlarında, %4 Na<sub>2</sub>O serisi yüksek M<sub>s</sub> oranlarında (1,2 ve 1,6) ve M<sub>s</sub>=0 (tüm Na<sub>2</sub>O oranlarında) olan harç karışımlarının mekanik özelliklerinin oldukça düşük düzeyde olduğu görülmüştür.

- iii.  $M_s=0$  olan karışımlar dışındaki harçların kuruma büzülmesi değerleri Portland çimentosu harçlarından ve literatürde belirtilen değerlerden yüksektir.
- iv. Su emme karakteristikleri bakımından en uygun sonuçlar  $M_s=0,8$  değerinde elde edilmiştir.
- v. Bu değerlendirmeler ışığında, standart kür durumunda kullanıma uygunluk açısından ortak bir kesişim kümesinin oluşmadığı görülmektedir. Bazı karışımlar işlenebilirlik, bazıları priz süresi, bazıları dayanım, bazıları ise kuruma büzülmesi karakteristikleri açısından Portland çimentosu harçlarından daha kötü performans sunmuştur.
- Isıl işlem uygulaması kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır. Özellikle otoklav kürü uygulanması durumunda kuruma büzülmesi ihmal edilebilecek düzeylere düşmüştür.
  - Buhar kürü uygulanması durumunda; %2  $Na_2O$  oranında yüksek  $M_s$  değerlerinde (1,2 ve 1,6), diğer  $Na_2O$  oranlarında ise  $M_s$  değerinin 0,4 ve üzerinde olduğu durumlarda mekanik özellikler bakımından oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir.
  - Otoklav kürüne maruz kalmış tüm karışımlar mükemmel bir dayanım performansı sergilemiş olup, çok düşük miktarlarda aktivatör kullanılarak (%2  $Na_2O$  ve  $M_s=0$ ) 70 MPa seviyelerinde dayanımların elde edilebileceği görülmüştür. Buhar kürünün  $M_s$  değeri 0,8'in üzerine çıktığında otoklav kürüne kıyasla daha iyi mekanik özellikler sunabildiği görülmüştür.

İkinci aşamada, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen harçların başta yüksek kuruma büzülmesi olmak üzere olumsuz özelliklerinin diğer mineral katkıları (uçucu kül, silis dumanı, metakaolin) ve kimyasal katkılarıyla (hava sürükleyici, köpük önleyici, büzülme önleyici) iyileştirilmesine ve RPC sınıfında betonların üretimine yönelik deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Silis dumanı işlenebilirliği, C sınıfı uçucu kül standart kürde mekanik özellikleri, her iki tip uçucu kül (F ve C sınıfı) ve alçı buhar küründe mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemiştir. Silis dumanı ve metakaolin ikamesi dayanımda şiddetli bir azalmaya neden olmasına rağmen, Portland çimentosu esaslı harçlardan bile daha fazla boyutsal stabiliteye sahip harçların üretimine olanak sağlamıştır. Diğer mineral katkıları da kuruma büzülmesinde azalma sağlamıştır.
- Kimyasal katkıları (hava sürükleyici, köpük önleyici ve büzülme önleyici) işlenebilirliği olumlu, dayanımı ise olumsuz yönde etkilemiştir. Kuruma büzülmesine etkileri ise önemsiz mertebelindedir.
- Basınç dayanımında yarattığı ciddi azalmaya rağmen, alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen bağlayıcıların en önemli sorunlarından olan yüksek kuruma büzülmesini ihmal edilecek düzeye indirmesi ve işlenebilirliği önemli ölçüde artırması nedeniyle silis dumanının alkali aktivasyon yöntemiyle üretilen harçların özelliklerini geliştirmede en etkin katkı maddesi olduğu görülmüştür.
- Yüksek fırın cürufu yerine %20 silis dumanı ikamesi, herhangi bir akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmadan su/bağlayıcı oranının 0,18 gibi çok düşük bir düzeye düşürülmesine olanak sağlamıştır. Karışım özelliklerinde de bir takım modifikasyonlar yapılarak (agrega olarak kuvars kullanımı, agrega/bağlayıcı oranının ağırlıkça 2 civarına düşürülmesi, çelik lif kullanımı, vb.) RPC sınıfında kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilmiştir.
- Yüksek fırın cürufu yerine %30 silis dumanı ikamesi basınç dayanımı bakımından, %20 silis dumanı ikamesi ise, tokluk ve eğilme dayanımı bakımından en olumlu sonuçları vermiştir.
- Yüksek fırın cürufunun aktive edilmesiyle üretilen RPC sınıfında kompozitlerin üretimi için, Portland çimentosu kullanılarak üretilen RPC'lerin aksine, buhar kürünün otoklav kürüne kıyasla daha uygun bir kür yöntemi olduğu görülmüştür.

- Çelik lif dozajını ve uzunluğunu belirlemeye yönelik deneyler, başta tokluk olmak üzere mekanik özelliklerdeki üstün performansından dolayı %3 kısa kesilmiş çelik lif yerine %1,5 uzun çelik lif kullanımının daha uygun olduğunu göstermiştir.
- Maliyet unsuru da göz önünde bulundurularak, kompozit karışımının tasarımında yüksek fırın cürufu yerine nispeten daha düşük oranda silis dumanı ikamesine (%20) ve hacimce %1,5 oranında 13 mm uzunluğunda, 0,16 mm çapında çelik lif kullanımına karar verilmiştir. Bu karışımın bağlayıcı dozajı  $900 \text{ kg/m}^3$  olup, bağlayıcının %4'ü oranında  $\text{Na}_2\text{O}$  içermektedir ve çözeltinin  $M_s$  değeri 1,2'dir. Bundan sonraki aşamada ARPC olarak adlandırılan bu karışımın kullanılmasına karar verilmiştir.

Üçüncü ve dördüncü aşamada, yüksek fırın cürufunun alkalilerle aktive edilmesiyle üretilen ARPC karışımının ve bağlayıcısı Portland çimentosu olan klasik KRPC karışımının reolojik, mekanik ve içyapı özellikleri detaylı olarak incelenmiş ve iki malzeme dayanıklılık özellikleri bakımından kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Her iki RPC (ARPC ve KRPC) karışımının basınç dayanımı 215 MPa civarında olup, ARPC karışımının eğilme dayanımı ve tokluğunun KRPC'den daha yüksek, elastisite modülünün ise daha düşük olduğu görülmüştür.
- Çelik donatıya aderans bakımından, ARPC karışımı KRPC'ye kıyasla olağanüstü bir performans göstermiştir.
- SEM incelemeleri, ARPC karışımının matris fazının nanometre boyutunda çok sayıda boşluktan oluştuğunu ve C-S-H yapının Ca/Si oranının oldukça düşük düzeyde olduğunu göstermiştir. XRD analizleri, ARPC karışımının amorf yapıda olduğunu göstermiştir. Cıva porozimetresi ölçümleri, boşluk boyutu dağılımının KRPC karışımına kıyasla daha kaba olduğunu göstermiştir.

- Her iki RPC karışımının da çevresel etkilere karşı dayanıklılık bakımından geleneksel betona kıyasla çok daha üstün olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık dayanıklılığı ve darbe dayanıklılığı açısından ARPC karışımının (boşluklu mikroyapının bir sonucu), klorür korozyonuna karşı donatı çeliğini koruma bakımından ise KRPC karışımının (geçirimsizliğinin çok yüksek olması nedeniyle) ARPC karışımına kıyasla bariz bir şekilde üstün performans sergilediği görülmüştür. ARPC karışımı, sülfürik asit ve magnezyum sülfat etkileri altında daha az görsel bozulma göstermiştir. Aşınma dayanıklılığı bakımından da ARPC karışımı daha üstün performans sergilemiştir. Diğer dayanıklılık problemleri bakımından ise, iki karışım benzer bir performans sunmuştur. Tablo 10.1’de iki karışımın özellikleri genel olarak karşılaştırılmış ve birbirlerine karşı üstün oldukları yönler belirtilmiştir. Yapılan kıyaslamaların basınç dayanımı 200 MPa üstü olan kompozitler için olduğu, klasik betona (örneğin, C30/37) kıyasla tüm bu özelliklerin çok daha üstün olduğu açıktır.

Tablo 10.1 ARPC ve KRPC'nin mekanik özellikler ve dayanıklılık bakımından karşılaştırılması

Mekanik özellik/Etki	KRPC	ARPC
Basınç dayanımı	Benzer	
Silindir yarma dayanımı	Benzer	
Kırılma enerjisi ve tokluk	yüksek	daha yüksek
Elastisite modülü	daha yüksek	yüksek
Çelik donatıya aderans	iyi	çok daha iyi
Alkali silika reaksiyonu (ASR)	iyi	iyi
Çiçeklenme	yok	yok
Sülfürik asit etkisi	iyi	daha iyi
Sodyum sülfat etkisi	iyi	iyi
Magnezyum sülfat etkisi	iyi	daha iyi
Hızlı klorür iyonu geçirimsizliği	daha iyi	iyi
Klorür korozyonu	çok daha iyi	iyi
Karbonatlaşma	iyi	iyi
Aşınma dayanıklılığı	iyi	daha iyi
Darbe dayanıklılığı	iyi	çok daha iyi
Yüksek sıcaklık dayanıklılığı	kötü	çok iyi
Donma-çözülme dayanıklılığı	iyi	iyi

Görüldüğü gibi, alkalilerle aktivasyon yöntemiyle üretilmiş RPC üstün özellikleriyle, Portland çimentosu ile üretilmiş RPC'ye iyi bir rakip olabilir. Bu bakımdan, bu iki ürünün maliyet açısından kıyaslanması önem taşımaktadır. Tablo EK-B'de kullanılan her bir malzemenin KDV dahil birim fiyatı ve sonuç ürün malzeme maliyetleri verilmiştir. Ancak, verilen maliyetler; işçilik, nakliye, tesis giderleri ve diğer kalemleri içermemektedir. Sadece piyasadan elde edilen malzeme maliyetleridir. Ayrıca, malzeme perakende fiyatlarının da endüstriyel üretime geçilmesi halinde değişeceği düşünülmektedir. Kesin maliyetler ancak ayrıntılı bir fizibilite etüdü sonrasında belirlenebilir. Tablo EK-B'den görüldüğü gibi, lifli ARPC karışımının maliyeti lifli KRPC karışımına kıyasla %12 daha düşüktür. Maliyet farkı, yüksek fırın cürufunun Portland çimentosundan, aktivatör çözeltisi olarak kullanılan kimyasalların (NaOH ve cam suyu) ise süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıdan daha ucuz olmasından kaynaklanmaktadır. Maliyeti oluşturan en büyük kalemin çelik lif olduğu görülmektedir. Bu nedenle, lifsiz olarak üretilen ARPC ve KRPC için maliyet farkı daha belirgindir. Bu durumda, ARPC karışımının maliyeti KRPC karışımından %29 daha düşük olmaktadır.

Sonuç olarak, ARPC karışımı özellikle prefabrikasyon sektörü için daha uygun, üstün performanslı yapı elemanları üretimine yönelik ideal bir malzeme olabilir. Yüksek sıcaklıklara, darbeye ve aşınmaya dayanıklılığı, donatıya üstün aderans özellikleri ile klorür korozyonundan uzak bölgeler için reaktif pudra betonlarından bile üstün dayanıklılık performansı ile ARPC ekonomik, çevreyi kirletmeyen bir yapı malzemesi olmaya adaydır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, farklı yüksek fırın cüruflarının ve farklı aktivatör sistemlerinin kullanımına yönelik çalışmalar ve daha büyük ölçekli yapısal elemanlar üzerinde saha deneyleri yapılması önerilebilir. Ayrıca, agrega en büyük tane boyutu azaltılarak, priz esnasında basınç altında sıkıştırma uygulanarak ve farklı özellikteki lifler kullanılarak ARPC'nin mekanik özelliklerinin daha fazla artırılmasına yönelik deneyler yapılması önerilebilir.

**KAYNAKLAR**

ACI 201.2R-92 (1992). Guide to durable concrete. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 222R-01 (2001). Protection of metals in concrete against corrosion. *Manual of Concrete Practice*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 544 (1988). Measurement of properties of fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, 85 (6), 583–589.

Alaee F. J. (2002). *Retrofitting of concrete structures using high performance fibre reinforced cementitious composite*. Cardiff University, Department of Civil Engineering, PhD Thesis.

Alonso, S. ve Palomo, A. (2001a). Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide-metakaolin solid mixtures. *Cement and Concrete Research*, 31, 25–30.

Alonso, S. ve Palomo, A. (2001b). Alkaline activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of temperature, activator concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47, 55–62.

Andersson, R. ve Gram, H. (1988). *Properties of alkali-activated slag*. In: *Alkali activated slag*. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute [9-63CBI Research].

ASTM C 1157–00a (2004). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.01, USA.

ASTM C 1202–97 (2004). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.02, USA.



- ASTM C 1260–01 (2004). *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.02, USA.
- ASTM C 1403–05 (2006). *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. Annual book of ASTM standards, USA.
- ASTM C 230/C 230M–98 (2004). *Standard Specification for Flow Table for use in Tests of Hydraulic Cement*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.01, USA.
- ASTM C 33–02a (2004). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.02, USA.
- ASTM C 348–97 (2004). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. Annual book of ASTM standards. Volume 04-01, USA.
- ASTM C 596–01 (2004). *Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.01, USA.
- ASTM C 642–97 (2004). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.02, USA.
- ASTM C 666–97 (2004). *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*. Annual book of ASTM standards. Volume 04.02, USA.
- ASTM C 876–91 (2004). *Test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. Annual book of ASTM standards. Volume 03.02, 11–16. American Society For Testing And Materials. PA.

- ASTM G1–03 (2004). *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. Annual book of ASTM standards. Volume 03.02, 17–25. American Society For Testing And Materials. PA.
- Aydın, S. (2004). Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Harç Geliştirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İzmir.
- Bakharev, T. (2005a). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35 (4), 658–670.
- Bakharev, T. (2005b). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1233–1246.
- 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.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (1999a). Alkali activation of Australian slag cements. *Cement and Concrete Research*, 29 (1), 113–120.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (1999b). Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (10), 1619–1625.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (2000). Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30, 1367–1374.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (2001a). Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation. *Cement and Concrete Research*, 31 (9), 1277–1283.

- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (2001b). Resistance of alkali-activated slag concrete to alkali-aggregate reaction. *Cement and Concrete Research*, 31 (9), 331–334.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (2002). Sulfate attack on alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 32 (2), 211–216.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G. ve Cheng, Y. B. (2003). Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 33 (10), 1607–1611.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*, D.E.Ü. Müh. Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Barbhuiya, S. A., Gbagbo, J. K., Russell, M. I. ve Basheer P. A. M. (2009). Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume. *Construction and Building Materials*, 23, 3233–3239.
- Barbosa, V. F., MacKenzie, K. J. ve 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.
- Bijen, J. ve Waltje, H. (1989). Alkali activated slag–fly ash cements. Fly ash, Silica fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. *Proceedings of the Third International Conference*, Trondheim, Norway SP114-76, 1566–1578.
- Blais P. Y., Couture M., (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge – world’s first reactive powder concrete structure, *PCI Journal New Technology*, 99, 61–70.
- Brough, A. R. ve Atkinson, A. (2002). Sodium silicate-based alkali-activated slag mortars. Part I. Strength, hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 32, 865–879.

- Byfors, K. K., Lehtonene, V., Pyy H. ve Romben, L. (1989). Durability of concrete made with alkali-activated slag. *Third International Conference on the Use of Natural Pozzolans, Fly Ash, Blast Furnace Slag and Silica Fume in Concrete, ACI SP-114*, 2, 1429–1466.
- Chang, J. J. (2003). A study on the setting characteristics of sodium silicate-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 33 (7), 1005–1011.
- Chang, J. J., Yeih, W. ve Hung, C. C. (2005). Effects of gypsum and phosphoric acid on the properties of sodium silicate-based alkali-activated slag pastes. *Cement and Concrete Research*, 27 (1), 85–91.
- Cheng, Q. H., Tagnit-Hamou, A. ve Sarkar, S. L. (1992). Strength and microstructural properties of waterglass activated slag. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 245, 49–54.
- Cheyrezy, M., Maret, V. ve Frouin, L. (1995). Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete), *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1491–1500.
- Collins, F. G. ve Sanjayan, J. G. (1999a). Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 29 (3), 455–458.
- Collins, F. G. ve Sanjayan, J. G. (1999b). Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder. *Cement and Concrete Research*, 29 (3), 459–462.
- Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (1999c). Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate. *Cement and Concrete Research*, 29 (4), 607–610.

- Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (1999d). Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete placed into a large column. *Cement and Concrete Research*, 29 (5), 659–666.
- Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (2000a). Cracking tendency of alkali-activated slag concrete subjected to restrained shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 30 (5), 791–798.
- Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (2000b). Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research*, 30 (3), 1401–1406.
- Collins, F. ve Sanjayan, J. G. (2001). Microcracking and strength development of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23 (4-5), 345–352.
- Criado, M., Palomo, A. ve Fernandez-Jimenez, A. (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, 84, 2048–2054.
- Davidovits, J. (1994). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Materials Education*, 16, 91–139.
- Douglas, E., Bilodeau, A., Brandstetr, J. ve Malhotra, V. M. (1991). Alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete: preliminary investigations. *Cement and Concrete Research*, 21, 101–108.
- Duxon, P., Provis, J., Grant, L., Mallicoat, S., Kriven, W. ve Deventer, J. (2005). Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids Surfaces*, 269, 47–58.

- Escalante-Garcia, J. I., Gorokhovskiy, A. V., Mendonza, G. ve Fuentes, A. F. (2003). Effect of geothermal waste on strength and microstructure of alkaliactivated slag cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 33, 1567–74.
- Felokoğlu, B. (2009). *Yüksek Performanslı Mikro Beton Tasarımı*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı, *Doktora Tezi*, İzmir.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35 (10), 1984–1992.
- Fernandez-Jimenez, A. ve Puertas, F. (2002). The alkali–silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1019–1024.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82, 2259–2265.
- Fernandez-Jimenez, A., Palomo, J. G ve Puertas, F. (1999). Alkali-activated slag mortars-Mechanical strength behaviour. *Cement and Concrete Research*, 29 (8), 1313–1321.
- Fletcher, R. A., Mackenzie, K. J. D., Nicholson, C. L. ve Shimada, S. (2005). The composition range of alumino silicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 1471–1477.
- Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. ve Fernandez-Jimenez, A. (2007). Alkali–aggregate reaction in activated fly ash systems. *Cement and Concrete Research*, 37 (2), 175–183.

- Glukhovskiy, V. D. (1981). *Slag – Alkali Concretes Produced from Fine-Grained Aggregate*, Vishcha Shkola, Kiev, USSR, in Russian.
- Gong, C. ve Yang, N. (2000). Effect of phosphate on the hydration of alkali-activated red mud-slag cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 30, 1013–1016.
- Goodspeed, C. H., Vanikar, S. ve Cook, R. A. (1998). *High performance concrete defined for highway structures*, FHWA-SA-98-082.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. ve Rangan, B. V. (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 101 (6), 467–472.
- Hertz, K.D. (1992). Danish investigations on silica fume concretes at elevated temperatures. *ACI Materials Journal*, 89, 345–347.
- Hu, S., Wang, H., Zhang, G. ve Ding, Q. (2008). Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag, *Cement and Concrete Composites*, 30 (3), 239–244.
- Ionecu, I. ve Ispas, T. (1986). Properties and durability of some Concretes containing binders based on slag and activated ashes. *2nd International Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Naturel Pozzolans in Concrete, ACI SP-91*, Madrid, Spain, 1475–1493.
- Jaarsveld, J. G. S., Deventer, J. S. J. ve Lukey, G. C. (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89, 63–73.
- Jaarsveld, J. G. S., Deventer, J. S. J. ve Lukey, G. C. (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters*, 1272–1280.

- Jiang, W., Silsbee, M. R., Breval, E. ve Roy, D. M. (1997). *Alkali activated cementitious materials in chemically aggressive environments*, K.L Scrivener, J.F. Young (Eds.), Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-Based Systems, E ve FN Spon, London, 289–296.
- Kirschner, A. ve Harmuth, H. (2004). Investigation of geopolymer binders with respect to their application for building materials. *Ceramics-Silikaty*, 48, 117–120.
- Khoury, A. (1992). Effect of very fine aggregate on concrete strength. *Materials and Structures*, 27, 185-194.
- Klimesch, D. S. ve Ray, A. (1997). The use of DTA/TGA to study the effects of ground quartz with different surface areas in autoclaved cement: quartz pastes. Use of the semi-isothermal thermogravimetric technique. *Thermochimica Acta*, 306, 159–165
- Krivenko, P. (1997). Alkaline cements: terminology classification, aspects of durability, in: H. Justnes (Ed.), *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, Gothenburg, Sweden, Amarkai and Congrex Göteborg, Gothenburg, Sweden, p.6.
- Krizan, D. ve Zivanovic, B. (2002). Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. *Cement and Concrete Research*, 32, 1181–1188.
- Langton, C. A. ve Roy, D. M. (1984). *Longevity of borehole and shaft sealing materials: characterization of ancient cement-based building materials*, G. McVay (Ed.), Scientific Basis for Nuclear Waste Management, 26, North Holland, New York, 543–549.



- Lee, W. K. W. ve Deventer, J. S. J. (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.
- Malek, R. I. A. ve Roy, D. M. (1997). Synthesis and Characterization of New Alkali-activated Cements, *Xth International Congress on the Chemistry of Cement*, 8 pp.
- Matte, V., Moranville, M. (1999). Durability of reactive powder composites influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes, *Cement and Concrete Composites*, 21, 1–9.
- Metso, J. (1982). Alkali reaction of alkali-activated Finnish blast furnace slag, *Silicates Industriels*, 4–5, 123–127.
- Miranda, J. M., Fernandez-Jimenez, A. ve Gonzalez, J. A., Palomo, A. (2005). Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and Concrete Research*, 35 (6), 1210–1217.
- Neto, A., Cincotto, M. A. ve Repette, W. (2008). Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. *Cement and Concrete Research*, 38 (4), 565–574.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete*. Prantice Hall, England.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008a). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1305–1314.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008b). Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. *Construction and Building Materials*, 22 (7), 1315–1322.

- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. ve Jalali, S. (2008c). Properties of tungsten mine waste geopolymeric binder. *Construction and Building Materials*, 22 (6), 1201–1211.
- Palacios, M. ve Puertas, F. (2007). Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and Concrete Research*, 37 (5), 691–702.
- Palomo, A., Blanco-Varela, M. T., Granizo, M. L., Puertas, F., Vazquez, T. ve Grutzeck, M. W. (1999). Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 29 (7), 997–1004.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W. ve Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Composites*, 29 (8), 1323–1329.
- Pan, Z. H., Cheng, L., Lu, Y. N., Yang N. R. (2002) Hydration products of alkaline-activated slag– red mud cementitious material, *Cement and Concrete Research*, 32 (3), 357–362.
- Pane, I. ve Hansen, W. (2005). Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, 35, 1155–1164.
- Pinto, A. T. (2004). *Alkali-activated metakaolin based binders*. PhD Thesis. University of Minho.
- Pu, X., Gan, C., Wu, L., ve Chen, J. (1989). Properties of alkali-slag (JK) concrete. *Bulletin of Chinese Ceramic Society (in Chinese)*, 1, 5–11.
- Puertas, F. ve Fernandez-Jimenez, A. (2003). Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 25 (3), 287–292.

- Puertas, F., Amat, T., Fernandez-Jimenez, A. ve Vazquez, T. (2003). Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. *Cement and Concrete Research*, 33 (12), 2031–2036.
- Puertas, F., Martinez-Ramirez, S., Alonso, S. ve Vazquez, T. (2000). Alkali-activated fly ash/slag cement Strength behaviour and hydration products. *Cement and Concrete Research*, 30 (10), 1625–1632.
- Ramachandran, V. S. (Ed.) (1995). *Concrete Admixtures Handbook* (2nd ed.), Noyes publications.
- RILEM Technical Committee 50-FMC (1985). Draft Recommendation: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams, *Materials and Structures*, 18 (106), 287–291.
- Richardson, I. G., Brough, A. R., Groves, G. W. ve Dobson, C. M. (1994). The characterization of hardened alkali-activated blast-furnace slag paste and the nature of the calcium silicate hydrate (C-S-H). *Cement and Concrete Research*, 24, 813–829.
- Rojas, M. F. (2006). Study of hydrated phases present in a MK–lime system cured at 60 °C and 60 months of reaction. *Cement and Concrete Research*, 36, 827–831.
- Rousekova, I., Bajza, A. ve Zivica, V. (1997). Silica fume-basic blast furnace slag systems activated by an alkali silica fume activator, *Cement and Concrete Research*, 27 (12), 1825–1828.
- Rowles, M. ve O'Connor, B. (2003). Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *Journal of Materials Chemistry*, 13, 1161–1165.

- Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements: Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 29 (2), 249–254.
- Roy, D. M., Jiang, W. ve Silsbee, M. R. (2000). Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties. *Cement and Concrete Research*, 30 (12), 1879 –1884.
- Schatzmann, M. (2005). *Rheometry for large particle fluids and debris flows*. PhD Thesis. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 16093, 192 pp. <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:27979>.
- Schrader, E. K. (1981). Impact resistance and test procedure for concrete, *ACI Materials Journal*, 78 (2), 141– 146.
- Shi, C. (1996). Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 26 (12), 1789-1799.
- Shi, C. (2003). Corrosion resistance of alkali-activated slag cement. *Advances in Cement Research*, 15 (2), 77-81.
- Shi, C. ve Day, R. L. (1999). Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends. *Advances in Cement Research*, 11 (4), 189–196.
- Shi, C. ve Stegemann, J. A. (2000). Acid corrosion resistance of different cementing materials. *Cement and Concrete Research*, 30 (5), 803 –808.
- Shi, C. ve Xie, P. (1998). Interface between cement paste and quartz sand in alkali-activated slag mortars, *Cement and Concrete Research*, 28 (6), 887–896.
- Shi, C., Krivenko, P.V., Roy, D. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. USA and Canada: Taylor and Francis.

- Shkolnick, Y. (1986). Physicochemical principles of the hydraulic activity of blast furnace slag. *Eighth International Congress for Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Theme 3, 133–136.
- Smith, M. A. ve Osborne, G. J. (1977). Slag/fly ash cements. *World Cement Technology*, 223–233.
- Talling, B. ve Brandstetr, J. (1989) Present state and future of alkali-activated slag concretes. *3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. Trondheim Norway, 1519–1546.
- Teoreanu, I., Volceanov, A. ve Stoleriu, S. (2005). Non Portland cements and derived materials. *Cement and Concrete Composites*, 27 (6), 650–660.
- TS 2824 EN 1338 (2005). *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-6 (2002). *Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3 (2002). *Çimento deney metotları-Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Wang, S. D. ve Scrivener, K. L. (1995). Hydration products of alkali activated slag cement, *Cement Concrete Research*, 25, 561–571.
- Wang, S. D., Pu, X. C., Scrivener, K. L. ve Pratt, P. L. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in Cement Research*, 27, 93–102.

- Wang, S. D., Scrivener, K. L. ve Pratt, P. L. (1994). Factors affecting the strength of alkali-activated slag. *Cement Concrete Research*, 24, 1033–43.
- Way, S. J. ve Shayan, A. (1989). Early hydration of a Portland cement in water and sodium hydroxide solutions: composition of solutions and nature of solid phases. *Cement and Concrete Research*, 19, 759–769.
- Wittmann, F. H. (1982). *Creep and shrinkage mechanisms*, in: Z.P. Bazant, F.H. Wittmann (Eds.), *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, Wiley, Chichester, 129-161.
- Xie, Z. ve Xi, Y. (2001). Hardening mechanisms of an alkaline activated class F fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31, 1245–1249.
- Xu, B. ve Pu, X. (1999). Study on solid alkaline AAS cement. *2<sup>nd</sup> International Conference on Alkaline Cements and Concretes (edited by Krivenko)*, Kiev, Ukraine, 58-63.
- Xu, H. ve Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 59, 247 – 266.
- Xu, H. ve Deventer, J. S. J. (2001). Effect of alkali metals on the preferential geopolymerization of stilbite/kaolinite mixtures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40, 3749–3756.
- Yang, K. H., Song, J. K., Ashour, A. F. ve Lee, E. T. (2007). Properties of cementless mortars activated by sodium silicate. *Construction and Building Materials*, 22 (9), 1981–1989.
- Yiğiter, H. (2008). *Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı, *Doktora Tezi*, İzmir.

- Yongde, L. ve Yao, S. (2000). Preliminary study on combined-alkali-slag paste materials. *Cement and Concrete Research*, 30 (6), 963-966.
- Young, J. F. (1988). *Physical mechanisms and their mathematical descriptions*, in: Z.P. Bazant (Ed.), *Mathematical Modelling of Creep and Shrinkage of Concrete*, Wiley, Chichester, 63- 98.
- Zhihua, P., Cheng, L., Lu, Y. ve Nanru, Y. (2002). Hydration products of alkali-activated slag–red mud cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 32 (3), 357–362.
- Zhihua, P., Dongxu, L., Jian, Y. ve Nanru, Y. (2003). Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud–slag cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 33 (9), 1437 –1441.
- Zivica, V. (2006). Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 28 (1), 21-25.
- Zivica, V. (2007). Effects of type and dosage of alkaline activator and temperature on the properties of alkali-activated slag mixtures. *Construction and Building Materials*, 21 (7), 1463–1469.

## **EKLER**



Tablo Ek-A Tez kapsamında adı geçen bazı kimyasal terminolojilerin formülleri

Aft (Etrenjit)	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ veya $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ( $\text{C}_6\text{A} \overline{\text{S}}_3 \text{H}_{32}$ )
Alçıtaşı (dihidrat)	$\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$
Analsim	$\text{NaAl}(\text{Si}_2\text{O}_6) \cdot (\text{H}_2\text{O})$
Asetik asit	$\text{CH}_3\text{COOH}$
Gehlenit	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
Hidrogarnet	Normal kompozisyonu (saf hali): $\text{C}_3\text{AH}_6$ Silisli hidrogarnet: $\text{C}_3\text{AS}_{3-x}\text{H}_{2x}$ ( $x = 0-3$ ) Demirli hidrogarnet: $\text{C}_3\text{FH}_6$ Demirli ve silisli hidrogarnet: $\text{C}_3\text{FS}_3$
Hidroklorik asit	$\text{HCl}$
Hidrotalsit	$\text{Mg}_6\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{16} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Hydronium	$\text{H}_3\text{O}^+$
Kalsit	$\text{CaCO}_3$
Karbonatlaşmış su	$\text{NaHCO}_3$
Laktik asit	$\text{CH}_3\text{CHOH-COOH}$
Mellilite	$(\text{CaNa})_2(\text{AlMgFe}^{+2})[(\text{AlSi})\text{SiO}_7]$
Mulite	$\text{Al}_{4.5}\text{Si}_{1.5}\text{O}_{9.75}$
Nitrik asit	$\text{HNO}_3$
Pirssonite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Portlandit (Kireç)	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Potasyum hidroksit	$\text{KOH}$
Sitrik asit	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$
Sodyum hidroksit	$\text{NaOH}$
Sodyum karbonat	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
Sodyum silikat (Cam suyu)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Stilbite	$\text{NaCa}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72} \cdot 30(\text{H}_2\text{O})$
Stratlingite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_2)(\text{OH})_{10} \cdot 2.5(\text{H}_2\text{O})$
Sülfürik asit	$\text{H}_2\text{SO}_4$
Thomsonite	$\text{Sr}_{1.4}\text{Ca}_{0.6}\text{NaAl}_5\text{Si}_5\text{O}_{20} \cdot 7.1(\text{H}_2\text{O})$
Tobermorit	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Xonotlite	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$

Tablo EK-B ARPC ve KRPC karışımları için hammadde maliyetlerinin analizi

	<b>Maliyet (TL/ton)</b>	<b>ARPC (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>KRPC (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>ARPC (TL/m<sup>3</sup>)</b>	<b>KRPC (TL/m<sup>3</sup>)</b>
YFC	40	720	---	29	--
PÇ	110	---	720	--	79
SD	700	180	180	126	126
Kuvars	120	1207,2	1278,5	145	153
Çelik lif	5900	117,8	117,8	695	695
Cam suyu	180	160	---	29	--
NaOH	900	30,9	---	28	--
SP (Glenium ACE 30)	3540	---	50	--	177
<i>Toplam maliyet lifli ARPC (TL/m<sup>3</sup>)</i>				1077	1231
<i>Toplam maliyet lifsiz ARPC (TL/m<sup>3</sup>)</i>				382	536