



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI

SERHAT ÇELİK TEN

Temmuz 2019



T.C.  
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN  
ARAŞTIRILMASI

SERHAT ÇELİK TEN

Doktora Tezi

Danışman

Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Temmuz 2019

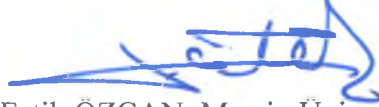
**Serhat ÇELİKTEN** tarafından **Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR** danışmanlığında hazırlanan “**Alkali İle Aktive Edilmiş Hafif Betonların Özelliklerinin Araştırılması**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



Başkan : Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Metin Hakan SEVERCAN Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Prof. Dr. Fatih ÖZCAN, Mersin Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi



Üye : Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray Üniversitesi

#### **ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../....../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../....../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Doç. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**



## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

  
Serhat ÇELİKTEN

## ÖZET

### ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÇELİKTEN, Serhat  
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman :Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

Temmuz 2019, 212 sayfa

Bu çalışmada, alkali ile aktive edilmiş hafif betonların özellikleri araştırılmıştır. Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Portland çimentolu kontrol karışımı hariç, 5 farklı seride 57 farklı alkali ile aktive edilmiş harç karışımı üretilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harç karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu kül, alkali aktivatör olarak da sodyum hidroksit ve sodyum silikat farklı oranlarda kullanılmıştır. Üretilen harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ), eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) ve basınç dayanımı ( $f_c$ ) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, seçilen harçlar üzerinde yüksek sıcaklık deneyi gerçekleştirilmiş, harçların birim ağırlık,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler irdelenmiştir. İkinci aşamada ise öncelikle her bir harç serisinden en iyi mekanik özelliklere sahip 2 harç karışımı seçilmiştir. Portland çimentolu kontrol karışımından hariç, seçilen harç karışımları ile aynı bağlayıcı faza sahip 10 farklı hafif beton karışımı üretilmiştir. Beton karışımlarında bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  ve su:bağlayıcı oranı 0.48 olarak belirlenmiştir. Beton karışımlarında agrega olarak farklı miktarlarda bazik pomza agregası kullanılmıştır. Hafif betonların çökme, birim ağırlık, su emme, kılcal su emme,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$ ,  $f_{sts}$  ve  $f_c$  değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, betonların ağırlık ve  $f_c$  değerlerinde asit, sülfat ve yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler incelenmiştir. Bu olumsuz etkilere karşı alkali ile aktive edilmiş betonların kontrol betonlarına göre daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Ayrıca, yüksek sıcaklık etkisinin seçilen harçların ve hafif betonların mikro yapılarında ve mineralojik kompozisyonlarında meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Uçucu kül, Yüksek fırın cürufu, Harç, Hafif beton, Alkali ile aktive etme.

## SUMMARY

### INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED LIGHTWEIGHT CONCRETES

ÇELİK TEN, Serhat  
Nigde Ömer Halisdemir University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering

Supervisor :Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR

July 2019, 212 pages

In this study, properties of alkali-activated lightweight concretes are investigated. This experimental study is performed in two stages. In the first stage, except from the control mortars produced with Portland cement, 57 different alkali-activated mortar mixtures in 5 series are manufactured. Blast furnace slag and fly ash are employed as precursors and sodium hydroxide and sodium silicate are used as the alkali activators at different ratios in the alkali-activated mortar mixtures. The unit weight, Ultrasound pulse velocity ( $U_{pv}$ ), flexural strength ( $f_{fs}$ ) and compressive strength ( $f_c$ ) values of the mortars are determined experimentally. In addition, after high temperature exposure, the changes in the unit weight,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  and  $f_c$  values of the selected mortars are investigated. In the second stage, two mortar mixtures have the highest mechanical properties in each series are selected. Except from the control mixture made with Portland cement, 10 different lightweight concrete mixtures which have the same binding phase with the selected 10 mortar mixtures are produced. The binder dosage and water to binder ratio of the concrete mixtures are determined as  $500 \text{ kg/m}^3$  and 0.48, respectively. Basaltic pumice aggregate is used in the concrete mixtures in different amounts as aggregate. The slump, unit weight, water absorption, capillary water absorption,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$ ,  $f_{sts}$  and  $f_c$  values of the lightweight concretes are determined experimentally. In addition, after exposure to acid, sulfate and high temperature, the changes in the weights and  $f_c$  values of the concretes are observed. Alkali-activated concretes are found to be more durable to these adverse effects than control concrete. Besides, the influence of high temperature on the microstructures and mineralogical compositions of the selected mortars and the concretes are examined.

*Keywords:* Fly ash, Blast furnace slag, Mortar, Lightweight concrete, Alkali-activated.

## ÖN SÖZ

Bu Doktora Tezi çalışmasında, endüstriyel atık malzemeler olan yüksek fırın cürufu ve uçucu külün alkaliler ile aktivasyonu ile harçlar ve betonlar üretilerek özellikleri ortaya konulmuştur. Öncelikle alkali ile aktive edilmiş harçlar üretilmiş, üretilen harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ile basınç dayanımı değerleri üzerinde bağlayıcı malzeme içeriğinin, sodyum (Na) konsantrasyonunun ve Ms modülünün (aktivatörlerin  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı) etkileri irdelenmiştir. Seçilen harçlar üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyi ile harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ile basınç dayanımı değerlerinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş hafif betonlar ile bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılarak kontrol betonları üretilmiştir. Üretilen alkali ile aktive edilmiş betonların dayanım, dayanıklılık ve mikro yapı özellikleri araştırılmış, hem birbirleriyle hem de kontrol betonlarıyla kıyaslanmıştır.

Doktora tezi çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, sayın Prof. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tez çalışmam boyunca tecrübelerine başvurduğum Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Prof. Dr. Fatih ÖZCAN, Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME ve Prof. Dr. Metin Hakan SEVERCAN hocalarıma teşekkür ederim.

Tüm öğrenimim boyunca benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması FEB 2018/10-BAGEP numaralı ve "Alkali ile Aktive Edilmiş Hafif Betonların Özelliklerinin Araştırılması" isimli proje ile Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....	xvi
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xvii
BÖLÜM I. GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II. HAFİF BETON .....	4
2.1 Hafif Betonun Tanımı .....	4
2.2 Hafif Betonun Tarihçesi .....	4
2.3 Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları .....	5
2.3.1 Hafif betonun avantajları .....	5
2.3.2 Hafif betonun dezavantajları .....	6
2.4 Hafif Betonun Üretimi ve Karışım Hesabı .....	6
2.5 Hafif Betonun Kullanım Alanları .....	7
2.6 Hafif Betonun Özellikleri .....	8
2.6.1 Taze beton özellikleri .....	8
2.6.2 Sertleşmiş beton özellikleri .....	9
2.6.2.1 Yoğunluğu .....	9
2.6.2.2 Basınç dayanımı .....	10
2.6.2.3 Çekme dayanımı .....	12
2.6.2.4 Eğilme dayanımı .....	13
2.6.2.5 Aderans ve şekil değiştirmesi .....	13
2.6.2.6 Elastisite modülü .....	15
2.6.2.7 Sünmesi .....	15
2.6.2.8 Rötresi .....	16
2.6.2.9 Yorulması .....	16

2.6.2.10 Su emmesi .....	16
2.6.2.11 Karbonatlaşması .....	17
2.6.2.12 Isıl özellikleri .....	18
2.6.2.13 Geçirimsizliği .....	18
2.6.2.14 Gaz difüzyonu .....	19
2.6.2.15 Akustik özellikler .....	19
2.7 Hafif Betonların Sınıflandırılması .....	19
2.7.1 Üretim yöntemine göre hafif betonlar .....	19
2.7.2 Birim ağırlık, dayanım ve kullanım amacına göre hafif betonlar .....	20
2.7.3 Kendiliğinden yerleşen hafif betonlar .....	22
2.8 Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar .....	23
2.8.1 Doğal hafif agregalar .....	24
2.8.1.1 Pomza .....	25
2.8.1.2 Volkanik tüf .....	25
2.8.1.3 Diatomit .....	26
2.8.2 Doğal malzemelerden elde edilen yapay hafif agregalar .....	27
2.8.2.1 Genleştirilmiş kil, şeyl ve arduvaz .....	27
2.8.2.2 Genleştirilmiş perlit .....	28
2.8.2.3 Genleştirilmiş polistren sert köpük .....	29
2.8.2.4 Genleştirilmiş vermikülit .....	29
2.8.3 Endüstri atığı veya yan ürünü olan hafif agregalar .....	30
2.8.3.1 Yüksek fırın cürufu .....	30
2.8.3.2 Uçucu kül .....	30
2.8.4 Endüstri atıkların işlenmesiyle elde edilen hafif agregalar .....	31
2.8.4.1 Genleştirilmiş cüruf .....	31
2.8.4.2 Yapay uçucu kül agregaları .....	31
2.8.5 Organik kökenli hafif agregalar .....	32
2.9 Hafif Betonun Dayanıklılığı .....	33
2.9.1 Kimyasal etkilere dayanıklılığı .....	33
2.9.2 Donma-çözülme etkisine dayanıklılığı .....	33
2.9.3 Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı .....	34
2.9.4 Aşınma direnci .....	34
2.9.5 Donatı korozyonuna etkileri .....	35
2.10 Hafif Beton Konusunda Yapılmış Olan Çalışmalar .....	35

BÖLÜM III. ALKALİ İLE AKTİVE ETME VE JEOPOLİMERİZASYON .....	41
3.1 Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon Tanımları .....	41
3.2 Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon ile İlgili İlk Çalışmalar.....	41
3.3 Alkali Aktivatörler ve Genel Özellikleri .....	43
3.3.1 Alkali hidroksitler .....	43
3.3.2 Alkali silikatlar .....	43
3.3.3 Alkali karbonatlar .....	44
3.3.4 Alkali sülfatlar .....	44
3.4 Alkali İle Aktive Edilmiş Betonların ve Jeopolimerlerin Özellikleri .....	44
3.4.1 Mikro yapısal ve kimyasal özellikler .....	44
3.4.2 Dayanım ve dayanıklılık .....	47
3.4.3 Su emme ve geçirgenlik .....	55
3.5 Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon Uygulamalarını Etkileyen Faktörler	57
3.5.1 İncelik .....	57
3.5.2 Kür koşulları .....	57
3.5.3 Aktivatör türü, miktarı ve Ms modülü .....	58
3.6 Uçucu Külün Jeopolimerizasyonu .....	58
3.7 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Alkali ile Aktivasyonu .....	59
3.8 Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon ile İlgili Yapılmış Çalışmalar .....	61
BÖLÜM IV. DENEYSEL ÇALIŞMA .....	73
4.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri .....	73
4.1.1 Çimento .....	73
4.1.2 Uçucu kül .....	74
4.1.3 Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu .....	74
4.1.4 Sodyum silikat .....	75
4.1.5 Sodyum hidroksit .....	75
4.1.6 Harç karışımlarında kullanılan kum .....	76
4.1.7 Hafif agrega .....	77
4.1.8 Karışım suyu .....	78
4.2 Harç Karışım Oranları .....	79
4.3 Harç Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları .....	81
4.4 Harç Deneyleri.....	83
4.4.1 Sertleşmiş birim ağırlık tayini .....	83
4.4.2 Ultrases geçiş hızı .....	84

4.4.2 Eğilme dayanımı .....	85
4.4.3 Basınç dayanımı .....	86
4.4.4 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi .....	87
4.5 Hafif Beton Karışım Oranları .....	87
4.6 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları .....	89
4.7 Beton Deneyleeri .....	90
4.7.1 Çökme (slump) deneyi .....	90
4.7.2 Taze betonun birim ağırlığı .....	91
4.7.3 Sertleşmiş birim ağırlık ve su emme .....	91
4.7.4 Kılcal su emme .....	93
4.7.5 Ultrases geçiş hızı .....	93
4.7.6 Eğilme dayanımı .....	94
4.7.7 Basınç dayanımı.....	95
4.7.8 Yarmada çekme dayanımı .....	95
4.7.9 Asit etkisine dayanıklılık deneyi .....	96
4.7.10 Sülfat etkisine dayanıklılık deneyi .....	97
4.7.11 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi .....	98
4.8 Mikro Yapı Analizleri.....	100
4.8.1 Harçlarda mikro yapı analizleri .....	100
4.8.2 Betonlarda mikro yapı analizleri .....	101
<b>BÖLÜM V. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>102</b>
5.1 Harç Deneyleeri .....	102
5.1.1 Sertleşmiş birim ağırlık .....	102
5.1.2 Ultrases geçiş hızı .....	107
5.1.3 Eğilme dayanımı .....	111
5.1.4 Basınç dayanımı .....	115
5.1.5 Harçların özellikleri arasındaki ilişkiler .....	119
5.1.5.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki .....	120
5.1.5.2 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki .....	123
5.1.6 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık .....	127
5.1.7 Hafif beton üretimi için bağlayıcı fazının belirlenmesi .....	131
5.2 Beton Deneyleeri .....	132
5.2.1 Çökme (slump) deneyi .....	132
5.2.2 Taze betonun birim ağırlığı .....	133



5.2.3 Sertleşmiş birim ağırlık ve su emme .....	133
5.2.4 Kılcal su emme .....	135
5.2.5 Ultrases geçiş hızı .....	137
5.2.6 Eğilme dayanımı .....	139
5.2.7 Basınç dayanımı .....	140
5.2.8 Yarmada çekme dayanımı .....	141
5.2.9 Asit etkisine dayanıklılık .....	142
5.2.10 Sülfat etkisine dayanıklılık .....	147
5.2.11 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık .....	150
5.2.12 Betonların özellikleri arasındaki ilişkiler.....	154
5.2.12.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki .....	154
5.2.12.2 Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki .....	155
5.2.12.3 Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki .	156
5.2.12.4 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki..	157
5.3 Mikro Yapı Analizleri.....	158
5.3.1 Harçlarda mikro yapı analizleri .....	158
5.3.2 Betonlarda mikro yapı analizleri .....	164
BÖLÜM VI. SONUÇLAR .....	180
KAYNAKLAR .....	186
ÖZGEÇMİŞ .....	211
TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER .....	212

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Hafif betonların basınç dayanımı ile çimento dozajı arasındaki ilişki .....	8
Çizelge 2.2. Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları .....	21
Çizelge 2.3. Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması .....	22
Çizelge 2.4. RILEM'e göre hafif beton sınıfları .....	22
Çizelge 2.5. Yapısal hafif betonun sahip olması gereken kriterler .....	23
Çizelge 3.1. Alkali ile aktivasyon uygulamalarının tarihçesi .....	42
Çizelge 3.2. Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin su emme ve geçirgenlikleri .....	56
Çizelge 3.3. Karışımların 2 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri .....	71
Çizelge 4.1. Çimento, bağlayıcı malzemeler ve pomzanın kimyasal özellikleri .....	74
Çizelge 4.2. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri .....	75
Çizelge 4.3. Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri .....	75
Çizelge 4.4. CEN standart kumunun elek analizi .....	77
Çizelge 4.5. Harç karışımları için malzeme miktar ve oranları .....	80
Çizelge 4.6. Bir metreküp beton karışımı için malzeme miktar ve oranları .....	88
Çizelge 5.1. Harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları	103
Çizelge 5.2. Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesinin değerlendirilmesi .....	111
Çizelge 5.3. Beton karışımlarının çökme ve taze birim ağırlık değerleri .....	132
Çizelge 5.4. Betonların sertleşmiş birim ağırlık ve su emme değerleri .....	134
Çizelge 5.5. Betonların zamana bağlı kılcal su emme değerleri .....	136
Çizelge 5.6. Betonların birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları .....	137
Çizelge 5.7. Betonların ultrases geçiş hızı değerleri .....	138
Çizelge 5.8. Betonların eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımları .....	140
Çizelge 5.9. Asitin betonların basınç dayanımlarına etkisi .....	143
Çizelge 5.10. Sülfatın betonların basınç dayanımlarına etkisi .....	148
Çizelge 5.11. Yüksek sıcaklığın betonların basınç dayanımlarına etkisi .....	152
Çizelge 5.12. Yüksek sıcaklığın betonların ağırlıklarına etkisi .....	153

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hafif betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasındaki ilişki. ....	10
Şekil 2.2. Hafif betonların çimento dozajları ve basınç dayanımları arasındaki ilişki ..	11
Şekil 2.3. Hafif betonların tek eksenli çekme mukavemeti. ....	12
Şekil 2.4. Hafif ve normal agregalı betonların kırılmaya başlama şekilleri .....	13
Şekil 2.5. Hafif betondaki agrega-çimento ara yüzeyi .....	14
Şekil 2.6. Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar .....	20
Şekil 2.7. İçeriğindeki agrega türüne göre hafif betonların sınıflandırılması .....	24
Şekil 3.1. Uçucu külden alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı elde edilmesi .....	46
Şekil 3.2. Bir katı alümina silikat bağlayıcı malzemenin alkali aktivasyon süreci .....	47
Şekil 3.3. Uçucu küllü jeopolimer üzerinde yapılmış bir SEM analizi .....	59
Şekil 3.4. C-A-S-H jelinin nano boyutta sembolik gösterimi .....	60
Şekil 4.1. Beton karışımlarında kullanılan BPA malzemesinin elek analizi .....	77
Şekil 4.2. Bazik pomza agregası .....	78
Şekil 5.1. 100A serisi harçların birim ağırlıkları .....	104
Şekil 5.2. 75A25B serisi harçların birim ağırlıkları .....	104
Şekil 5.3. 50A50B serisi harçların birim ağırlıkları .....	105
Şekil 5.4. 25A75B serisi harçların birim ağırlıkları .....	106
Şekil 5.5. 100B serisi harçların birim ağırlıkları .....	106
Şekil 5.6. 100A serisi harçların ultrases geçiş hızları .....	107
Şekil 5.7. 75A25B serisi harçların ultrases geçiş hızları .....	108
Şekil 5.8. 50A50B serisi harçların ultrases geçiş hızları .....	109
Şekil 5.9. 25A75B serisi harçların ultrases geçiş hızları .....	109
Şekil 5.10. 100B serisi harçların ultrases geçiş hızları .....	110
Şekil 5.11. 100A serisi harçların eğilme dayanımları .....	111
Şekil 5.12. 75A25B serisi harçların eğilme dayanımları .....	112
Şekil 5.13. 50A50B serisi harçların eğilme dayanımları .....	113
Şekil 5.14. 25A75B serisi harçların eğilme dayanımları .....	114
Şekil 5.15. 100B serisi harçların eğilme dayanımları .....	114
Şekil 5.16. 100A serisi harçların basınç dayanımları .....	115
Şekil 5.17. 75A25B serisi harçların basınç dayanımları .....	116

Şekil 5.18.	50A50B serisi harçların basınç dayanımları .....	117
Şekil 5.19.	25A75B serisi harçların basınç dayanımları .....	118
Şekil 5.20.	100B serisi harçların basınç dayanımları .....	118
Şekil 5.21.	100A serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	120
Şekil 5.22.	75A25B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi ..	121
Şekil 5.23.	50A50B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi ..	121
Şekil 5.24.	25A75B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi ..	122
Şekil 5.25.	100B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	122
Şekil 5.26.	Harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	123
Şekil 5.27.	100A serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi .....	124
Şekil 5.28.	75A25B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi ...	124
Şekil 5.29.	50A50B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi ...	125
Şekil 5.30.	25A75B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi ....	126
Şekil 5.31.	100B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi .....	126
Şekil 5.32.	Harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi .....	127
Şekil 5.33.	Yüksek sıcaklığın harçların birim ağırlıklarına etkisi .....	128
Şekil 5.34.	Yüksek sıcaklığın harçların ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi .....	129
Şekil 5.35.	Yüksek sıcaklığın harçların eğilme dayanımlarına etkisi .....	130
Şekil 5.36.	Yüksek sıcaklığın harçların basınç dayanımlarına etkisi .....	131
Şekil 5.37.	Betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları .....	133
Şekil 5.38.	Betonların ağırlıkça yüzde su emme değerleri .....	135
Şekil 5.39.	Betonların zamanın kareköküne bağlı kılcal su emme değerleri .....	136
Şekil 5.40.	Betonların ultrases geçiş hızı değerleri .....	139
Şekil 5.41.	Betonların eğilme dayanımları .....	140
Şekil 5.42.	Betonların basınç dayanımları .....	141
Şekil 5.43.	Betonların yarmada çekme dayanımları .....	142
Şekil 5.44.	Asit çözeltilisinin betonların basınç dayanımlarına etkisi .....	144
Şekil 5.45.	Asit etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları .....	146
Şekil 5.46.	Sülfat çözeltilisinin betonların basınç dayanımlarına etkisi .....	148
Şekil 5.47.	Sülfat etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları .....	150
Şekil 5.48.	Yüksek sıcaklığın betonların basınç dayanımına etkisi .....	152
Şekil 5.49.	Yüksek sıcaklık etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları ...	154
Şekil 5.50.	Betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi .....	155
Şekil 5.51.	Betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi .....	156

Şekil 5.52. Betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi .....	157
Şekil 5.53. Betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi.....	157
Şekil 5.54. Harçların XRD analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1:75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1 .....	159
Şekil 5.55. Harçların SEM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1:75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1 .....	161
Şekil 5.56. Harçların yakınlaştırılmış SEM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1:75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1 .....	162
Şekil 5.57. Harçların EDS analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1:75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1 .....	163
Şekil 5.58. Harçların PLM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1 .....	165
Şekil 5.59. Betonların XRD analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 .....	170
Şekil 5.60. Betonların XRD analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 .....	171
Şekil 5.61. Betonların SEM analizleri; K: kontrol,100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 .....	172
Şekil 5.62. Betonların yakınlaştırılmış SEM analizleri; K: kontrol,100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25i .....	173
Şekil 5.63. Betonların SEM analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 .....	174
Şekil 5.64. Betonların matrislerinin EDS analizleri; K: kontrol,100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 .....	175
Şekil 5.65. Betonlardaki BPA malzemesinin EDS analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 .....	176
Şekil 5.66. Betonların EDS analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 .....	177
Şekil 5.67. Betonların PLM analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 .....	178
Şekil 5.68. Betonların PLM analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 .....	179

## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Pomza agregası kullanılarak yapılan Pantheon Kubbesi .....	5
Fotoğraf 2.2. Genleştirilmiş kil agregasının görünümü.....	27
Fotoğraf 2.3. Genleştirilmiş uçucu kül agregası .....	32
Fotoğraf 4.1. Çimento, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu .....	74
Fotoğraf 4.2. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit .....	76
Fotoğraf 4.3. CEN standart kumu .....	76
Fotoğraf 4.4. Hobart mikseri.....	82
Fotoğraf 4.5. Harçların üretimi .....	82
Fotoğraf 4.6. Harç karışımlarının kalıplarına yerleştirilmiş hali .....	83
Fotoğraf 4.7. Alkali ile aktive edilmiş harçların ağırlıklarının bulunması .....	84
Fotoğraf 4.8. Harçların ultrases geçiş sürelerinin belirlenmesi .....	85
Fotoğraf 4.9. Harçların eğilme dayanımlarının belirlenmesi .....	86
Fotoğraf 4.10. Harçların basınç dayanımlarının belirlenmesi .....	86
Fotoğraf 4.11. Sertleşmiş beton numunelerin görünümü .....	90
Fotoğraf 4.12. Betonların eğilme dayanımlarının belirlenmesi .....	94
Fotoğraf 4.13. Betonların yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesi .....	96
Fotoğraf 4.14. Asit etkisinde kalan betonların görünümleri .....	97
Fotoğraf 4.15. Sülfat etkisinde kalan betonların görünümleri .....	98
Fotoğraf 4.16. Betonların yüksek sıcaklık fırınındaki görünümleri .....	99
Fotoğraf 4.17. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların görünümleri .....	99

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
%	Yüzde
$\mu\text{m}$	Mikro metre
$\mu\text{s}$	Mikro saniye
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
$\Delta d$	Suya doygun yüzey kuru haldeki sertleşmiş betonun birim ağırlığı
$\Delta k$	Etüv kurusu haldeki sertleşmiş betonun birim ağırlığı
$\Delta t$	Taze betonun birim ağırlığı
$\pi$	Pi sayısı
$\theta$	teta
$^{\circ}$	derece
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
a	Numunenin Suyla Temas Eden Yüzey Alanı
b	Numune Eni
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	Amerika Beton Enstitüsü
AFm fazları	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})(\text{OH})_6\text{X}\cdot n\text{H}_2\text{O}$
$A_i$	Betonların Asit, Sülfat veya Yüksek Sıcaklık Deneyine Tabi Tutulmadan Önceki Ağırlığı
$A_s$	Betonların Asit, Sülfat veya Yüksek Sıcaklık Deneyine Maruz Bırakıldıktan Sonraki Ağırlığı
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
BP	Bazik Pomza
BPA	Bazik Pomza Agregası
$\text{C}_2\text{S}$	$2\text{CaOSiO}_2$
$\text{C}_3\text{S}$	$3\text{CaOSiO}_2$
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
C-(N)-A-S-H	Sodyum İlaveli Kalsiyum Alümina Silikat Hidrat

C-A-S-H	Kalsiyum Alümina Silikat Hidrat
CEB	Avrupa-Uluslararası Beton Komitesi
CEM I	Portland Çimentosu
CEM II	Portland Kompoze Çimento
CEN	Avrupa Standartlar Komitesi
cm	Santimetre
d	Numune Yüksekliği
D	Hafif Betonun Birim Hacim Kütlesi Sınıfı
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
$d_{su}$	Suyun Yoğunluğu
$d_k$	Dakika
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
ESCSI	Genleştirilmiş Şist, Kil ve Arduaz Enstitüsü
$f_c$	Basınç Dayanımı
$f_{ck, sil/küp}$	Betonun, Silindir/Küp Numune Kullanılarak Tayin Edilen Karakteristik Basınç Dayanımı
$f_{fs}$	Eğilme Dayanımı
FIB	Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu
FIP	Uluslararası Ön Germe Federasyonu
$f_{sts}$	Yarmada Çekme Dayanımı
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
g	Gram
GPa	Giga Paskal
I	Kılcal Su Emme, mm
k	Kelvin
Kg	Kilogram
Kgf	Kilogram Kuvvet
l	Litre
L	Numune Uzunluğu
LC.../...	Hafif Beton İçin Basınç Dayanımı Sınıfları
m	Metre
M	Molar
M.Ö.	Milattan Önce
M.S.	Milattan Sonra



mm	Milimetre
MPa	Mega Paskal
Ms	Alkali Aktivatörlerin SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O Oranı (Aktivatör Modülü)
mt	Numune Ağırlığında t Zamanda Meydana Gelen Değişim
N	Newton
N-A-S-H	Sodyum Alümina Silikat Hidrat
N-A-S-(H)	Sodyum Alümina Silikat Hidrat (Bazı Çalışmalarda Suyun Bu Jelde Baskın Olmadığını İfade Etmek İçin H Parantez İçinde Gösterilmiştir)
NMR	Nükleer Manyetik Rezonans
ÖİK	Özel İhtisas Komisyonu
pH	Bir Maddenin Asitlik veya Bazlık Derecesini İfade Eder
PLM	Polarize Işık Mikroskopisi
P <sub>d</sub>	Suya Doygun Yüzey Kuru Haldeki Sertleşmiş Betonun Ağırlığı
P <sub>k</sub>	Etüv Kurusu Haldeki Sertleşmiş Betonun Ağırlığı
P <sub>t</sub>	Taze Betonun Ağırlığı
R	Erken Dayanımı Yüksek
RILEM	Uluslararası Laboratuvar ve Malzeme Uzmanları Birliği
S	Harç veya Betonun Ses Dalgası Gönderilen Yüzeyi ile Dalganın Alındığı Yüzeyi Arasındaki Mesafe
S <sub>e</sub>	Betonun Ağırlıkça Su Emme Oranı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
sn	Saniye
t	Ses Üstü Dalganın Numuneden Geçiş Süresi
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü
TS	Türk Standartları
UK	Uçucu Kül
U <sub>pv</sub>	Ultrases Geçiş Hızı
V <sub>s</sub>	Sertleşmiş Betonun Hacmi
V <sub>t</sub>	Taze Betonun Hacmi
W	Watt
XRD	X Işını Kırınımı
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Beton, sudan sonra dünyada en çok kullanılan malzemedir. Dünyada her yıl 10 milyar tonu aşkın beton tüketilmektedir. Betona dayanım kazandıran bağlayıcı fazını oluşturan malzeme olarak genellikle Portland çimentosu kullanılmaktadır (Aitcin, 2000; Hewlett, 1998). Bu çok fazla miktardaki çimento tüketimi çeşitli çevresel kaygıları da beraberinde getirmektedir. Bu kaygılardan biri de dünyadaki CO<sub>2</sub> salınımının yaklaşık %8'inin çimento endüstrisinden kaynaklanıyor olmasıdır. 1 ton çimento üretimi sırasında kalsinasyon işleminin gerçekleşebilmesi için uygulanacak yüksek sıcaklığın elde edilebilmesi amacıyla fosil yakıtların yakılması ve kalsiyum karbonatın bu yüksek sıcaklıklarda bileşenlerine ayrılması nedeniyle toplamda 0.8 ton CO<sub>2</sub> açığa çıkmaktadır (Gartner, 2004). Mevcut beton tüketiminin neden olduğu CO<sub>2</sub> salınımının başlıca sorumlusunun çimento olması nedeniyle çimento ile birlikte çimento yerine çeşitli mineral katkıları kullanılmakta veya çimento benzeri daha çevre dostu alternatif malzeme elde etmeye çalışılmaktadır. Portland çimentosu üretiminde alternatif yakıtların kullanımı, betonda çimento kullanımının optimizasyonu, puzolanların geri kazanımı ve çimentoyla karıştırılması gibi mevcut en iyi teknolojik gelişmelerin çimento üretimi ve kullanımından kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunu %17'ye kadar azaltabileceği ortaya konulmuştur (Damtoft vd., 2008). Ayrıca, atıkların verimli bir şekilde geri dönüşümü, ekonomik ve ekolojik açıdan oldukça önemlidir. Bu çerçevede, çevre kirliliğine neden olan endüstriyel atıkların geri kazanımı ve beton üretimi maliyetinin azaltılması amacıyla, betonun neredeyse tüm özellikleri, uygun katkı kullanımı ile değiştirilip iyileştirilebilmektedir. Bu amaçla, kimyasal katkıları ile puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay malzeme, geçmişten günümüze inşaat sektöründe ve özellikle beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır (Bilim, 2006). Atık veya endüstriyel yan ürün olan puzolanik malzemelerin beton üretiminde çimentoya ikame olarak kullanılmasının yanı sıra bu malzemelerle Portland çimentosu içermeyen bağlayıcı üretimine dair de çalışmalar yapılmaktadır. Portland çimentosu kullanılmadan bir bağlayıcı üretimine yönelik çalışmalardan biri de, doğal ve yapay puzolanların alkalilerle aktivasyonudur. Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin geleneksel Portland çimentosuna göre en önemli üstünlüklerinden biri olarak neden oldukları CO<sub>2</sub> salınımının Portland çimentolu bağlayıcılara göre çok daha düşük olması ve çevresel tasarrufların sağlanması

olarak sıklıkla ifade edilmiştir (Juenger vd., 2011). Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların neden oldukları CO<sub>2</sub> salınımının Portland çimentolu bağlayıcılara göre daha az olmasının ana nedeni Portland çimentosu üretimindeki kalsinasyon işleminin uygulanmamış olmasıdır (Provis ve Deventer, 2014).

Sıklıkla büyük depremlere neden olan fay sistemine sahip olan ülkemizde, bu fayların neden olduğu depremler nedeniyle can ve mal kayıpları meydana gelmektedir. Ülkemiz dışında büyük depremlerin meydana geldiği Japonya gibi bazı ülkelerde can ve mal kayıplarının ülkemizde meydana gelen kayıplara göre daha az olmasının önemli bir nedeni de hafif yapı malzemelerinin bu ülkelerde yaygın olarak kullanılıyor olmasıdır. Bina ölü yükünü önemli ölçüde azaltan hafif beton gibi ağırlığı nispeten daha düşük olan yapı malzemeleri depremlerin meydana getirdiği sarsıntıları boşluklu yapıları sayesinde azaltmaktadırlar (Doğan ve Şener, 2004). Taşıyıcı elemanların yanı sıra yapı ağırlığının azaltılması için döşemelerin ve bölme duvarlarının hafif malzemelerle yapılması da önemlidir (Bayülke, 1998). Döşeme ağırlığının azaltılmasının bir yolu da geleneksel beton yerine hafif beton kullanılmasıdır. Türkiye’de son zamanlarda yapı sektöründe hafif beton bloklarının ve pomza agregası gibi hafif agregalarla üretilen yapı elemanlarının kullanımı yaygınlaşmaya başlamış ve bu elemanlar hakkında daha fazla araştırma yapılmaya başlanmıştır.

Özel beton türlerinden biri olan hafif beton, ağırlığının az oluşu, yüksek yalıtım özelliğine sahip olması ve yangına dayanıklılığı gibi önemli avantajları nedeniyle önem arz etmektedir. Hafif betonun ağırlığının geleneksel betona göre daha az olmasının nedeni yapısında boşluklu agrega bulunması, boşluklu içyapı oluşturulması veya harç bünyesinde gaz kabarcıkları oluşturulmasıdır. Hafif beton kullanılan yapıların zati ağırlığında azalma sağlandığından bu yapılardaki elemanların kesit boyutları küçülmekte ve dolayısıyla daha ekonomik bir çözüm elde edilmektedir. Hafif betonların yapıların ağırlığını azaltması sayesinde yapıya etkiyecek deprem yükleri de azalmaktadır. Ayrıca, bu avantajların yanında yapıda kullanılacak hafif betonun normal betona göre genellikle daha düşük dayanıma sahip olması, hafif olmaları nedeniyle üretiminde yaşanan zorluklar ve yüksek su emme kapasitelerinden dolayı meydana gelebilecek rötre çatlakları gibi sakıncalarına karşı da gerekli önlemler alınmalıdır (Baradan vd., 2012).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı üretimi ile ilgili ve Portland çimentosu ile üretilmiş hafif betonlar ile ilgili birçok çalışma vardır. Ancak, alkali ile aktive edilmiş hafif betonlar ile ilgili yeterli sayıda çalışma yoktur. Bu çalışmanın amacı öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu külü (UK) alkalilerle aktive ederek ülkemiz ham madde kaynaklarından olan bazik pomza agregasını (BPA) da kullanarak alkali ile aktive edilmiş hafif betonlar üretmek ve üretilen betonların özelliklerini ortaya koymaktır. Bu amaçla, çalışmada öncelikle YFC ve UK malzemeleri alkalilerle aktive edilerek 57 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımlarda YFC ve UK ağırlıkça 5 farklı oranda kullanılmış ve harç karışımları bu oranlara göre 5 seri halinde üretilmiştir. Harçlarda %4 ile %8 arasında değişen Na içeriği ve 0.25 ile 2.00 arasında değişen aktivatör modülü (moleküler silika modülü, Ms modülü) değişkenlerinin harçların mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Alkaliler ile aktive edilmiş harçlarla Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçlarının birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ), eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) ile basınç dayanımı ( $f_c$ ) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçlardan elde edilen deneysel sonuçlar hem birbirleriyle hem de kontrol harçlarıyla karşılaştırılmış, Na konsantrasyonu ile Ms modülünün sonuçlar üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Belirlenen kür koşullarında en iyi mekanik özelliklere sahip 10 harç karışımı seçilmiş ve seçilen harç karışımları ile kontrol harçlarının bağlayıcı fazı hafif betonlarda aynı şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca, seçilen harç karışımları üzerinde yüksek sıcaklık uygulamaları gerçekleştirilmiş ve yüksek sıcaklığın harçların birim ağırlık,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerinde meydana getirdiği değişimler irdelenmiştir. Kontrol betonları ile birlikte toplamda 11 karışım halinde üretilen beton karışımlarında bağlayıcı dozajı  $500\text{kg/m}^3$ , su:bağlayıcı oranı da 0.48 olarak belirlenmiş, karışımlarda agrega olarak sadece BPA malzemesi kullanılmıştır. Hafif betonların çökme, taze birim ağırlık, sertleşmiş birim ağırlık, su emme, kılcal su emme,  $U_{pv}$ ,  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hafif betonlar üzerinde yüksek sıcaklık uygulamaları gerçekleştirilmiş ve yüksek sıcaklığın betonların ağırlıklarında ve  $f_c$  değerlerinde meydana getirdiği değişimler irdelenmiştir. Bununla birlikte, betonların ağırlıklarında ve  $f_c$  değerlerinde asit ve sülfat etkisinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklık etkisinin seçilen harçların ve hafif betonların mikro yapılarında meydana getirdiği değişimler SEM (taramalı elektron mikroskobu), EDS (enerji dağılım spektrometresi), XRD (X-ışını kırınımı) ve PLM (polarize ışık mikroskopisi) analizleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak, üretilen alkali ile aktive edilmiş hafif betonların özellikleri ortaya konulmuş, birbirleriyle ve kontrol betonuyla kıyaslanmıştır.

## BÖLÜM II

### HAFİF BETON

#### 2.1. Hafif Betonun Tanımı

Hafif beton, çeşitli yollarla içerisinde boşluklar oluşturularak ya da birim hacim ağırlığı normal agregadan daha düşük agregalar kullanılarak elde edilen birim hacim ağırlığı 2000 kg/m<sup>3</sup>'den düşük olan özel bir beton türüdür (Baradan vd., 2012). Hafif betonun tanımı ile ilgili olarak standartlarda farklı tanımlamalar yapılmıştır. TS EN 206:2013+A1 (2017) standardına göre hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim ağırlığı 800 kg/m<sup>3</sup> ile 2000 kg/m<sup>3</sup> arasında olan ve kısmen veya tamamen hafif agregalarla üretilen betondur. ACI 213R-03 (2003) standardında taşıyıcı hafif beton, hafif agregalarla üretilen  $f_c$  değeri en az 17 MPa ve 28 günlük hava kurusu birim ağırlığı 1120 kg/m<sup>3</sup> ile 1920 kg/m<sup>3</sup> arasında olan yapısal beton olarak tanımlanmıştır. ASTM C330/C330M (2014) standardında agrega olarak sadece hafif agregaların kullanıldığı hafif betonların birim ağırlığının en fazla 1760 kg/m<sup>3</sup>, hafif agrega ve normal agrega karışımı ile üretilen hafif betonların birim ağırlığının ise en fazla 1840 kg/m<sup>3</sup> olması gerektiği ifade edilmiştir. ASTM C330/C330M (2014) standardına göre hafif betonların minimum  $f_c$  değeri 17 MPa olmalıdır.

#### 2.2. Hafif Betonun Tarihçesi

Hafif betonların tarihi M.Ö. Romalılar dönemine dayanmaktadır. Bünyesinde hafif beton olduğu kabul edilen ve günümüze ulaşmış en eski yapılara Ayasofya, Cosa Limanı, St. Sofia Katedrali, Fotoğraf 1'deki Pantheon Kubbesi, ve Kolezyum örnek olarak verilebilir (ACI 213R-03, 2003; ESCSI, 1960). Önce yalıtım amaçlı olarak kullanılan hafif betonların yapılan çalışmalar neticesinde taşıyıcı beton olarak kullanılabilirliği keşfedilmiş ve yapılarda bu amaçla kullanılmaya başlanmıştır (Neville, 2000). ABD'de 1920'li yıllarda yapılan "Wesport Lisesi", "Park Plaza Hotel" ve "South Western Bell Telephone Company", 1960'lı yıllarda inşa edilen "Marina City Towers", "Lake Point Tower", "One Shell Tower" ve "Raymond Hilliard Centre" binaları yakın zamanların hafif betonla inşa edilmiş olan ilk yapı örnekleridir (Clarke, 1993; Colaco, 2004; ESCSI, 1960). Bu örnekler haricinde 20. Yüzyılda hafif betonun kullanıldığı diğer önemli yapı örnekleri: 1967'de Avustralya'da yapımı tamamlanmış olan 50 katlı ve 184 m

uzunluğundaki “Australia Square” binası ve İskoçya’da yapılan temel ve bodrum katı haricindeki tüm taşıyıcı sistemi hafif betonla tasarlanmış olan “Roxburgh County Offices” binası; 1970’li yıllarda İngiltere’de 122 m ve 145 m yüksekliklerindeki iki kuleden oluşan “Guy’s Hospital” binası ve Hollanda’da yapılan “Dukenburgse Köprüsü”dür (Clarke, 1993; Gül ve Geçten, 1994).



**Fotoğraf 2.1.** Pomza agregası kullanılarak yapılan Pantheon Kubbesi (Alexander ve Mindess, 2010)

### **2.3. Hafif Betonun Avantajları ve Dezavantajları**

#### **2.3.1. Hafif betonun avantajları**

İnşaat sektöründe normal ağırlıklı beton yerine hafif beton kullanımı; ölü yüklerin ve kesit boyutlarının azaltılmasını sağlaması, ısı yalıtımını geliştirmesi, çelik donatı sarfiyatını azaltması, taşıma ve nakliye kolaylığı sağlaması ve genel düşük maliyeti nedeniyle daha uygundur (Chandra ve Berntsson 2002). Ölü yükün azalması ile birlikte daha hafif ve daha küçük kesit alanına sahip yapılar ve temeller oluşturulabilmesine olanak sağlanmış olur. Bu sayede çimento ve donatı tüketiminde azalma meydana gelebilmektedir. Kolonlarda ve kirişlerde meydana gelen kesit azalması sayesinde yapılarda daha geniş bir kullanım alanı sağlanır. Daha küçük ve daha ucuz prekast eleman üretimi için daha hafif ve küçük taşıma ve dağıtım ekipmanı yeterli olmaktadır. Bu sayede daha kolay ve ucuz taşıma ve dağıtım yapılabilmektedir. Hafif beton, daha iyi ısı yalıtımına sahiptir ve yangına daha dayanıklıdır (Kayalı, 2008). Hafif beton kullanılarak inşa edilen yapıların ölü yüklerinin azalması ile yapılara etkiyen düşey yüklerde azalma meydana gelir ve böylece depremin yapılara etkisi azalmış olur (Dikici 2010). Hafif agregalı beton birçok

avantajı olması nedeniyle yapısal amaçlar için yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmakta ve üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu avantajlardan bazıları; yüksek mukavemet:ağırlık oranı, daha iyi çekme deformasyonu kapasitesi, düşük termal genleşme katsayısı ve hafif agregalardaki hava boşluklarından kaynaklı iyi ısı ve ses izolasyonuna sahip olmasıdır (Chen ve Liu, 2008).

### **2.3.2. Hafif betonun dezavantajları**

Hafif betonun yerleştirme ve üretim işlemlerinin daha nitelikli işçilik gerektirmesi maliyeti artırmaktadır. Hafif betonun kesme dayanımı normal betona göre genelde daha düşüktür. Yapılarındaki hafif agregalardan kaynaklı olarak  $f_c$  değerleri ve aşınmaya dayanıklılıkları sınırlıdır. Hafif betonların rötresi ve sünmesi normal betona göre daha fazladır. Daha yüksek  $f_c$  elde edebilmek için hafif betonlarda daha yüksek çimento dozajı gerekebilir, bu durumda da toplam maliyette artış meydana gelebilir. Hafif betonların  $f_c$  değerlerinde artış sağlayabilmek için kullanılan fazla miktardaki çimento da hidrasyon ısısında artışa neden olur (Dilli, 2015). Hafif betonların elastisite modülünün normal betona göre daha düşük olmasından dolayı hafif beton ile üretilen yapı elemanlarında dönme ve sehim oluşma riski daha fazladır (Dikici, 2010). Hafif betonları vibrasyon ile yerine yerleştirmek sorunlar teşkil edebilmektedir (Altun, 2005). Ayrıca, hafif beton normal betona göre daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu için betonarme yapılarda donatıyı korumak için daha kalın pas payı tabakasına ihtiyaç vardır (Aktaş, 2007). Hafif betonun en önemli dezavantajlarından biri kırılma tokluğunun aynı  $f_c$  değerine sahip normal ağırlıklı betona göre daha düşük olmasıdır (Chandra ve Berntsson, 2002; Wang ve Li, 2003). Örneğin, hafif köpük betonun kırılma enerjisi normal ağırlıklı betona göre oldukça düşüktür (Hengst ve Tressler 1983). Yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımlarının  $f_c$  değerine oranı yüksek dayanımlı normal betonlara göre daha düşüktür (Zhang ve Gjvorv 1991). Bunun nedeni çimento matrisinin dayanımından daha düşük dayanıma sahip olan hafif agrega içeriğidir (Wang ve Li 2003).

### **2.4 Hafif Betonun Üretimi ve Karışım Hesabı**

Hafif beton üretimi için çoğunlukla üç farklı yöntem tercih edilmektedir. Bunların ilki normal agregadan daha yüksek poroziteye sahip ve dolayısıyla daha düşük birim hacim ağırlığı olan hafif agregaların normal agregalar yerine beton üretiminde kullanılmasıdır.

İkinci yöntem hücreli, köpük ya da gaz beton olarak da bilinen içine kimyasal veya mekanik yollarla bilinçli olarak hava küreciklerinin yerleştirildiği hafif betonlardır. Üçüncü yöntem ise ince agregaya kullanmadan sadece iri agregaya ve çimento hamurundan oluşan boşluklu yapıda hafif bir beton matrisi elde edilmesidir (Neville ve Brooks, 2008). Genellikle hafif beton üretiminde en çok tercih edilen yöntem olduğu için “hafif beton” terimi normal agregaya yerine tamamen veya kısmen hafif agreganın kullanıldığı “hafif agregalı beton” anlamında kullanılmaktadır. Bu çalışmada da hafif beton ifadesi hafif agregalı beton ile aynı anlamda kullanılacaktır. Hafif agreganın su emici özelliğinden dolayı hafif betondaki efektif su:çimento oranının azalışını tahmin etmek oldukça zordur. Bu zorluk sadece hafif agregaların büyük oranlarda su emmesinden değil, aynı zamanda da bazı agregaların birkaç hafta hala su emmeye devam etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, hedeflenen mekanik özellikleri elde edebilmek için karışım hesaplarında kullanılmak üzere geçerli bir su:çimento oranının önceden belirlenmesi mümkün değildir. Bu yüzden hafif betonların karışım hesabında ACI tarafından önerilen, agreganın kuru ve gevşek hacmi ile çimento hacminin tahmin edildiği ve su miktarının da karışım hazırlanırken deneysel olarak bulunduğu hacimsel metot yerine; yine ACI tarafından önerilen, önceden belirlenen çökme değerine göre su ve çimento ağırlıklarının deneysel olarak tahmin edilmesi ve daha sonra agregaya ağırlığının da hesaplanması esasına dayanan özgül ağırlık faktörü yöntemi tercih edilmektedir. Karışım hesaplarında dikkate almak üzere, hafif agregalı betonun  $f_c$  değerlerinin belirli bir çökme değeri için su:çimento oranından ziyade çimento içeriği ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Çoğu durumda belirli miktarda çimento ve su içeren hafif betonların  $f_c$  değerleri iri agreganın maksimum tane boyutunun azaltılması veya hafif ince agreganın bir kısmının iyi kalitedeki normal ağırlıklı kumla yer değiştirilmesi suretiyle artırılabilir (Clarke, 1993; Mehta ve Monteiro, 2006). Çimento içeriği ile tamamen hafif agregalarla veya iri hafif agregaya ile birlikte normal ağırlıktaki kum karışımından oluşan hafif betonların  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki Çizelge 2.1.’de verilmiştir.

## **2.5 Hafif Betonun Kullanım Alanları**

Tasarım esnekliği ve genel maliyet düşüklüğü sağlaması gibi önemli yararları nedeniyle hafif betonun yapı uygulamalarında kullanımı son yıllarda büyük ilgi çekmektedir. Özellikle deprem bölgelerinde inşa edilen yapıların deprem nedeniyle oluşacak yanal kuvvetlere maruz kalmasından dolayı bu yapılarda düşük ağırlığı sebebiyle hafif beton



tercih edilir (Mo vd., 2016). Hafif beton, yapı sektöründe yapısal olmayan duvar panelleri, tuğla ve mimari amaçlı dış cephe kaplaması yapımında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Hafif betonun mekanik özellikleri normal ağırlıklı betona göre düşük olduğu için yapılarda yük taşıyan elaman üretiminde kullanımı sınırlıdır. Hafif beton yapısal amaçlı olarak kullanılmak istendiğinde, hafif betonun uygun süneklik ve dayanıma sahip olması için doğru karışım tasarımı yapılması ve hafif betona uygun malzeme kullanılması gerekmektedir (Arısoy ve Wu, 2008). Hafif betonlar bina yapımında, köprü üstyapısı kaplamalarında yaygın olarak ve tüm köprü üstyapılarında sınırlı olarak kullanılmaktadır (Jo vd., 2007).

**Çizelge 2.1.** Hafif betonların basınç dayanımı ile çimento dozajı arasındaki ilişki (ACI 213R-87)

Basınç Dayanımı (MPa)	Çimento İçeriği (kg/m <sup>3</sup> )	
	Sadece Hafif Agregaya ile Üretilen	Doğal Kum ve Hafif Agregaya Karışımı ile Üretilen
17	240-305	240-305
21	260-335	250-335
28	320-395	290-395
34	375-450	360-450
41	440-500	420-500

## 2.6 Hafif Betonun Özellikleri

### 2.6.1 Taze beton özellikleri

Hafif agregalı betonların işlenebilirliği yerçekiminin beton karışımına katılan hafif malzemelere etkisi sebebiyle normal betonlara göre daha düşüktür. Hafif agregalı betonlarda iyi bir işlenebilirlik elde edebilmek için 50 mm ile 75 mm arasındaki çökme değerleri önerilmiştir. Hafif agregalı betonlarda yüksek çökme değerleri iri agregaların yüzeye çıkmasına ve daha ağır olan harç malzemesinin tabana inmesine neden olur. Bu sebeple yüzey düzeltme işlemlerinde büyük zorluklar ortaya çıkabilir. ACI 213R-87 (1987) standardında, hafif agregalı beton kullanılan döşemelerde iyi bir yüzey elde edilebilmesi için betonun maksimum çökme değerinin 100 mm olması gerektiği belirtilmiştir (Hassanpour vd., 2012). Düşük ağırlıklı olması ve bünyesinde hava boşlukları bulundurması nedeniyle hafif agregalar kolaylıkla su emerler ve çimento

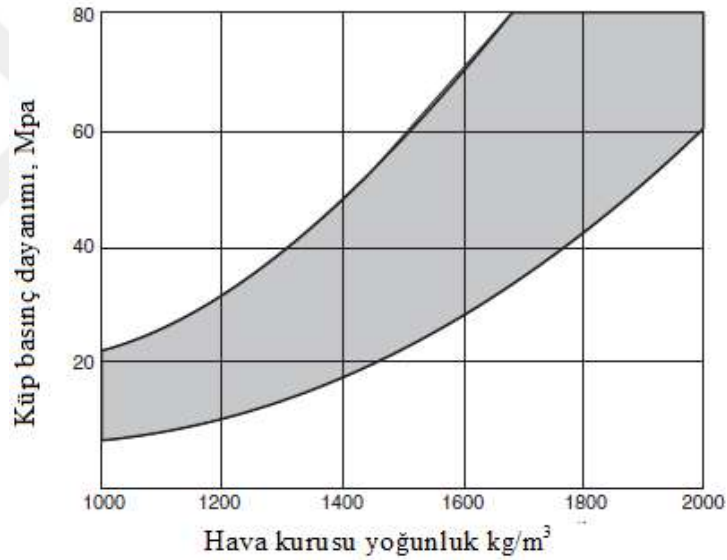
pastası ile karışımı sırasında yüzeye çıkma eğilimi gösterirler. Bu durum da hafif betonun işlenebilirliğini, dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz etkiler (Chen ve Liu 2008). Bu nedenle agrega tanesinin su emme oranı ve hızını etkileyen faktörlerden olan agregaların boşluk hacminin, boşluk dağılımının ve bünyesindeki boşlukların sürekli veya süreksiz oluşunun tespiti önem kazanmaktadır (Clarke, 1993). Hafif beton karışımında bulunan hafif agrega içeriğinin çimento içeriğine oranı arttıkça taze haldeki hafif betonun çökme değerinde azalma meydana gelmektedir. Bu nedenle aynı işlenebilirliğe sahip hafif beton ile normal betonun çökme değerleri farklılık gösterebilmektedir. Bu ihtimal göz önüne alındığında, hafif betonların karışım oranları hesaplanırken kullanılan hafif agregaların birim ağırlıkları ve su emme oranları ve de karışımdaki çimento dozajı mutlak surette dikkate alınmalıdır (Kabay, 2009). Hafif agrega tanelerinin bünyelerindeki boşluklarda bulunan suyun zamanla beton matrisine difüzyonu ile hafif betonların olumsuz kür koşullarına karşı dayanıklılığı normal betona göre daha iyi olmaktadır (Neville, 2000). Vibrasyon uygulaması normal betona kıyasla hafif betonda daha fazla segregasyona sebep olabilmektedir (ACI 213R-03, 2003). Pompalama basıncına maruz kalan hafif agregalar karışım suyunun bir bölümünü emebilmektedir. İşlenebilirlikte meydana gelebilecek kaybı önlemek için pompalama işleminden önce hafif agregaları uygun bir şekilde ıslatmak gerekir. Ön ıslatma, hafif agregaların karışım suyunu emme oranını büyük ölçüde azaltırken harçta meydana gelebilecek su transferini de azaltır. Ön ıslatma, agrega bağıl yoğunluğunu ve taze betonun yoğunluğunu artıran bir uygulamadır. Ön ıslatmadan kaynaklı agregadaki yüksek su içeriği zamanla beton içine dağılır. Bu durum, hafif betonda uzun süre içsel kür oluşmasını sağlar ve taze beton ile sertleşmiş beton yoğunluğu arasında normal betona göre daha büyük bir fark oluşmasına neden olur (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif ince agrega yerine kısmen normal ince agrega ikamesi hafif betonun yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin daha kolay yapılabilmesini sağlar (Baradan vd., 2012).

## **2.6.2 Sertleşmiş beton özellikleri**

### **2.6.2.1 Yoğunluğu**

Hafif betonların yoğunluğu özellikle içeriğindeki agregaların yoğunluğu, agrega gradasyonu, agregaların nem içeriği, çimento dozajı, su:bağlayıcı oranı, karışım oranları, yerleştirme ve sıkıştırma kalitesi, kür şartları ve hafif beton üretim tekniği gibi faktörlere

bağlıdır (Topçu, 1988; Uygunoğlu, 2008). Sertleşmiş haldeki hafif betonun yoğunluğu genel itibariyle taze haline göre daha düşüktür. Bunun nedeni de nem kaybıdır (Lamond ve Pielert, 2006). Yarı doymun ya da doymun haldeki hafif agregalarla üretilen betonların yoğunluğu kuru hafif agregalarla üretilenlere göre daha fazladır, çünkü agrega nemliliği ile birlikte beton yoğunluğu da artar (Clarke, 1993). TS EN 206:2013+A1 (2017) standardında, hafif betonlar birim hacim ağırlıklarına göre altı farklı sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıflamaya göre hafif betonun en düşük birim hacim ağırlığı  $800 \text{ kg/m}^3$ , en yüksek birim hacim ağırlığı ise  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Hafif betonun yoğunluğu dayanım ve dayanıklılık özellikleri açısından önemlidir ve yoğunluk ile bu özellikler arasında lineer bir ilişki olmasa da yoğunluğun artışı ile birlikte bu özelliklerde genel itibariyle iyileşme olmaktadır. Bu durum, hafif betonun etüv kuru yoğunluğu ile küp  $f_c$  değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren Şekil 2.1'de de görülmektedir.

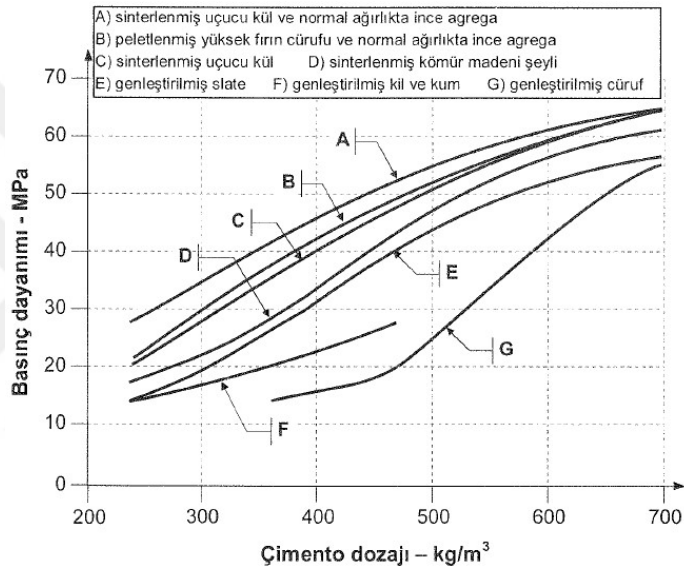


Şekil 2.1. Hafif betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (FIP, 1983)

### 2.6.2.2 Basınç dayanımı

Hafif betonun  $f_c$  değerlerini bileşenlerinin türü ve miktarı, agrega nemlilik durumu, yaşı ve uygulanan kür yöntemi gibi birçok faktör etkilemektedir. Hafif agrega içeriğinin artışı ile birlikte hafif betonun  $f_c$  değerleri genel itibariyle azalmaktadır. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaları suya doymun olarak kullanmak betonun  $f_c$  değerlerini artırmaktadır. Normal agregalar yerine bu agregalardan daha zayıf yapıda olan hafif agregaların kullanılması daha güçlü harç ve yüksek çimento dozajı gerektirir. Hafif

betonların  $f_c$  değerleri genelde çimento dozajı ile birlikte artar. Ancak, çimento miktarı ile birlikte dayanımdaki artış özellikle hafif betonda kullanılan agrega tipi ve çimentonun içeriği gibi faktörlere de bağlıdır. Şekil 2.2’de farklı agrega türleri ve 50 mm çökme ile üretilen hafif betonların çimento dozajı ile 28 günlük  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Ek olarak, hafif betonların zamana bağlı  $f_c$  artışı normal betondan biraz daha farklıdır. Hafif agregalardaki hapsolmuş durumdaki suyun zamanla beton matrisinde henüz hidrasyona katılmamış durumda bulunan çimento tanecikleri ile reaksiyona girmesi ile betonun  $f_c$  değerlerinde zamana bağlı bir artış meydana gelebilmektedir (Clarke, 1993; Kabay, 2009).

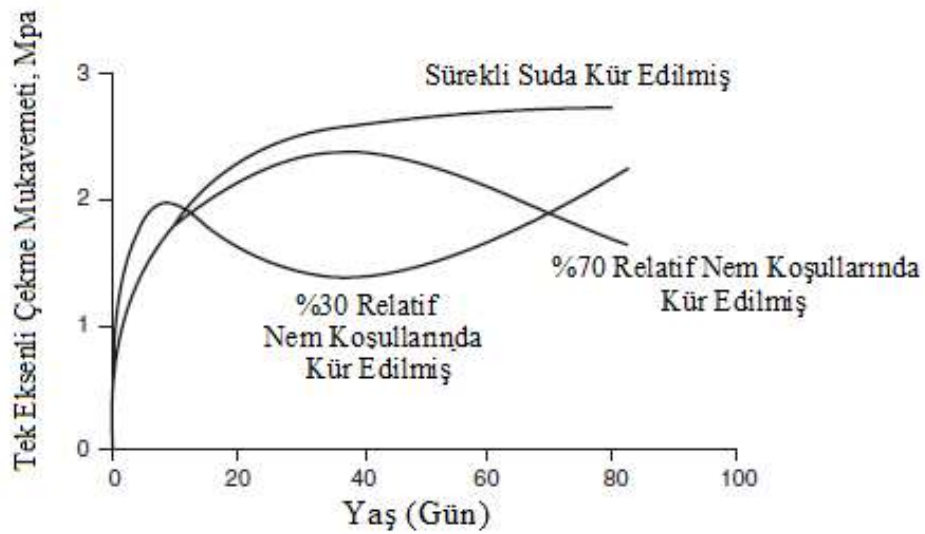


**Şekil 2.2.** Hafif betonların çimento dozajları ve basınç dayanımları arasındaki ilişki (Baradan, 2012)

Genel olarak dayanımları yüksek olan yapay ve endüstriyel yan ürünlerin işlenmesiyle elde edilen agregalarla  $f_c$  değeri yüksek olan yapısal hafif beton üretilebilmektedir. Bu agregalarla  $f_c$  değeri 35 MPa’den daha yüksek hatta 90 MPa  $f_c$  değerine sahip hafif beton elde edilebilmektedir. Bu tür hafif betonların yoğunlukları biraz daha fazla olduğu için yalıtım özellikleri çok iyi değildir. Ancak yine de geleneksel betona göre genellikle daha iyi yalıtım özelliği gösterirler. Ayrıca, betonun su:bağlayıcı oranı azaldıkça dayanımda lineer olmayan bir artış olmaktadır. Düşük su:bağlayıcı oranı ile hafif beton üretmek istendiğinde hafif agregaların yüksek su emme kapasitesinden dolayı beton bileşenlerinin karışım oranlarının belirlenmesinde zorluklar ortaya çıkmaktadır. Aynı dayanıma sahip normal betona kıyasla hafif betonlar için genellikle daha yüksek çimento ve mineral katkı içeriğine ihtiyaç duyulur (Baradan vd., 2012)

### 2.6.2.3 Çekme dayanımı

Hafif betonların  $f_c$  değerlerini etkileyen faktörler aynı zamanda çekme dayanımlarını da etkilemektedir (Clarke, 1993). Normal ağırlıklı betonla aynı  $f_c$  değerlerine sahip hafif agregalı betonların  $f_{sts}$  değerleri değerleri %30'a kadar düşebilmektedir (CEB/FIP, 1977). Fiber ilavesi genel itibariyle hafif agregalı betonların  $f_{sts}$  değerlerinde önemli bir artış sağlar (Balaguru ve Dipsia, 1993). Kalıbından çıkarıldıktan sonra %30 ve %70 rölatif nem koşulları ile sürekli nemli ortamda muhafaza edilen hafif beton numunelerinin tek eksenli çekme mukavemetleri Şekil 2.3'de gösterilmiştir (Newman, 2003). Deney zamanına kadar suda kür edilmiş ya da sürekli olarak nemli tutulmuş hafif betonların çekme dayanımı değerleri ile  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon bulunur. Hatta bu koşullardaki hafif betonların çekme dayanımları aynı  $f_c$  değerine sahip normal betonun çekme dayanımına eşit olabilmektedir. Hafif betonların özellikle erken yaşlarda kuruma şekli ve hızı bu betonların çekme mukavemetlerini önemli ölçüde etkilemektedir. Hafif betonun nem kaybı yavaş olarak gerçekleşiyorsa, betonun iç kısmı nemli kalırken dış tarafı kurur. Bu durumda da dış yüzde çekme gerilmeleri oluşurken, halen nemli durumda olan iç kısımda ise basınç gerilmeleri meydana gelir. Böylece, erken yaşlarda kurumaya maruz bırakılan hafif betonun dış yüklemeye karşı çekme dayanımı sürekli nemli ortamda tutulan betona göre daha az olmaktadır. Hafif betonların  $f_{sts}$  değerleri aynı  $f_c$  değerine sahip normal betonun çekme mukavemetinin yaklaşık %70'i ile %100'ü arasında değerler almaktadır (ACI 213R-87, 1987).



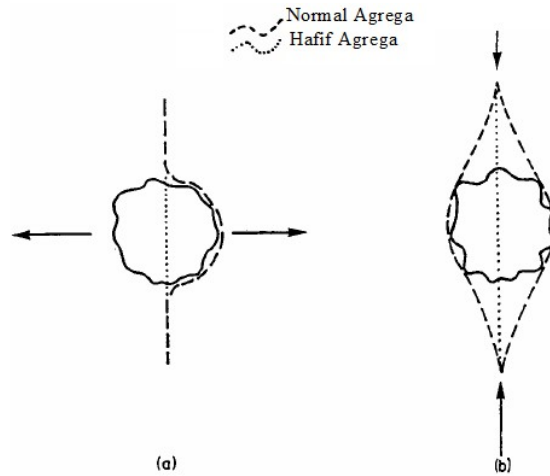
Şekil 2.3. Hafif betonların tek eksenli çekme mukavemeti (Newman, 2003)

#### 2.6.2.4 Eğilme dayanımı

Normal ağırlıklı betonla aynı  $f_c$  değerlerine sahip hafif agregalı betonların  $f_{fs}$  değerleri, normal ağırlıklı betonların  $f_{fs}$  değerlerinden genellikle daha düşüktür (Domagała, 2011). Hafif betonda meydana gelen nem kaybının neden olduğu iç gerilmeler  $f_{fs}$  değerlerini  $f_{sts}$  değerlerinden daha çok etkilemektedir (Clarke, 1993).

#### 2.6.2.5 Aderans ve şekil değiştirmesi

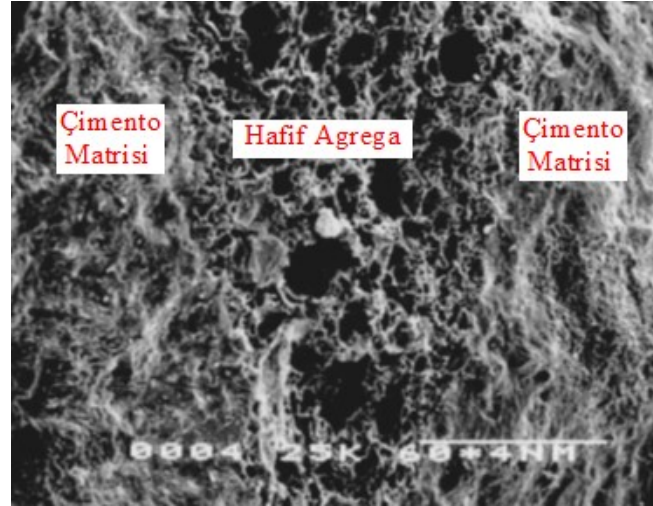
Hafif agregalı betonların  $f_c$  değerleri ve çekme dayanımı değerleri genel itibariyle normal agregalı betonlara kıyasla daha düşüktür. Normal agregalı betonda normal agreganın dayanımının yüksek olmasından dolayı kırılma agregası ile çimento hamuru arasındaki ara yüzeyde başlarken, bu durum hafif agregası ile üretilen betonlarda değişmektedir. Hafif agregalı betonlarda hafif agregası dayanımı agregası ile çimento hamuru arasındaki ara yüzeyinin dayanımından genel itibariyle daha düşük olduğu için kırılma agregasında başlar (Uygunoğlu, 2008). Bu nedenle, hafif beton ile normal betonun kırılma şekli farklı olmaktadır. Hafif agregalı beton ile normal betonun çekmede (a) ve basınçta (b) kırılmaya başlama yörüngeleri Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Hafif ve normal agregalı betonların kırılmaya başlama şekilleri  
a: çekme etkisinde, b: basınç etkisinde (Clarke, 1993)

Hafif betonlar aynı  $f_c$  değerlerine ve karışım oranlarına sahip normal betona göre daha kırılğan bir yapıya sahiptir (Balendran vd., 2002). Bunun nedeni agregası taneleri ile çimento matrisi arasındaki iyi aderans ve yüksek aderans kaynaklı erken mikro çatlak

gelişiminin olmayışıdır (Dikici 2010). Hafif agregaların elastisite modülünün normal agregalara göre daha düşük olmasından dolayı hafif agregalı betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinin eğimi daha fazla olmaktadır (Neville, 2000). Ayrıca, hafif agregaların genel olarak normal agregalara göre daha az rijit olması ve hafif betonların  $f_c$  değerlerini yükseltebilmek için çimento dozajında artışa gidilmesi, hafif betonlarda normal betonla aynı gerilmede daha fazla deformasyon oluşmasına sebep olur (Clarke, 1993). SEM analizlerinde hafif agregalar ile çimento pastası ara yüzeyinin dayanımının normal agregalar ile çimento pastası ara yüzey dayanımından genel itibariyle daha iyi olduğu görülmüştür (Mehta ve Monteiro, 2006). Hafif agregalar ile çimento pastası ara yüzeyinin daha yüksek dayanıma sahip olması; hafif agregalı betonlarda agrega taneleri ile çimento pastası arasındaki güçlü bağ oluşumundan, hafif agregaların pürüzlü yüzey yapısı nedeniyle oluşan sürtünme etkisinden, hafif agrega ile çimento pastasının elastisite modüllerinin birbirlerine yakın olmasından kaynaklı olarak termal gerilmelerin oluşmamasından ve beton taze halde iken hafif agregalarca emilen suyun daha ileri bir zamanda hidrate olmamış çimento taneleri ile hidrasyon reaksiyonu oluşturmasından kaynaklanmaktadır (Neville, 2000). Hafif agrega ile çimento pastası arasındaki yüksek bağ dayanımını ve iç içe geçmiş çimento matrisi ile hafif agregayı gösteren SEM analizi sonuçları Şekil 2.5’de sunulmuştur (Mehta ve Monteiro, 2006).



**Şekil 2.5.** Hafif betondaki agrega-çimento ara yüzeyi (Mehta ve Monteiro, 2006)

Hafif agregalı betonların kırılma yapısını değiştirmek ve hafif agregalı betonlara daha yüksek mekanik özelliklere sahip bir yapı kazandırmak için çelik, polimer, cam, karbon ve hibrit gibi fiberleri kullanmak iyi bir çözüm olabilir. Genel itibariyle hafif betonların

mekanik özellikleri normal betona göre daha zayıftır. Ancak, son zamanlarda birbirinden farklı türlerde hafif agregaların kullanıldığı  $f_c$  değerleri 50 ile 100 MPa arasında olan yüksek mukavemetli hafif agregalı betonlar üretilmektedir (Hassanpour vd., 2012). Düşük su:bağlayıcı oranı ile üretilen hafif betonların aderans mukavemetlerinin geleneksel betona göre daha iyi olduğu belirtilmiştir. Su kürü ve çelik fiber ilavesi hafif betonların aderans mukavemetlerini genel olarak olumlu yönde etkilemiştir. Hafif betonların deforme olmuş çelik donatılarla aderans mukavemetleri, diğer çelik çubuklara göre tabakalı olan yapısından kaynaklı olarak, daha iyidir. Donatı çapı ve donatı uzunluğu da hafif beton ile donatı arasındaki aderansı etkilemektedir. Daha kısa ve donatı çapı daha küçük olan donatılar ile hafif betonlar arasındaki aderans daha iyidir. Etriye gibi betonu sınırlayıcı bir şeyin varlığı ve uygulanan yanal basınç, hafif betonun aderans mukavemetini artırır. Ayrıca, hafif betonların kırılma sonrası davranışlarının geleneksel betona göre daha gevrek olduğu, bir başka çalışmada da rapor edilmiştir (Mo vd., 2016).

#### **2.6.2.6 Elastisite modülü**

Normal ağırlıklı betonla aynı  $f_c$  değerlerine sahip hafif agregalı betonların elastisite modülleri %25 ile %50 oranları arasında daha düşüktür (Neville ve Brooks, 2008). Bunun nedeni hafif agregaların elastisite modüllerinin genel itibarıyla normal agregalardan daha düşük olması ve hafif betonlardaki çimento içeriğinin daha fazla olmasıdır. Hafif agreganın içeriğinin artışı ile birlikte hafif agregalı betonun elastisite modülü değerleri de azalır (Hassanpour vd., 2012). Hafif betonların elastisite modüllerinin daha düşük olmasından dolayı normal betonla aynı yüke maruz kalan hafif betonlar normal betonlara göre daha fazla deformasyon gösterir. Hafif betonların düşük elastisite modülleri, yapı elemanlarının belirli yükte daha büyük deformasyon yapmasına neden olmakla birlikte hafif betonların bu elemanların ölü yüklerini azaltması düşük elastisite modülünün sebep olduğu büyük deformasyonları nispeten azaltır (Clarke, 1993).

#### **2.6.2.7 Sünmesi**

Herhangi bir beton türünün sünme özelliklerini etkileyen temel faktörler su:çimento oranı, agreganın özellikleri, uygulanan yükün miktarı ve süresi, kür yöntemi ve uygulanan gerilmenin mukavemete olan oranıdır (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif agregalı betonların elastisite modülünün aynı  $f_c$  değerine sahip normal betona göre daha düşük



olmasından ve bu betonlardaki çimento içeriğinin daha fazla olmasından dolayı gösterdikleri sünme deformasyonu daha fazla olmaktadır (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993). Hafif agregalı betonun temel sünmesi normal betonun yaklaşık 1.0 ile 1.15 katı arasında iken kuruma sünmesi genellikle çok daha yüksektir (Newman, 2003).

#### **2.6.2.8 Rötresi**

Hafif betonun rötresi agregaların rijitliğine, karışımda kullanılan malzeme oranlarına, ortam şartlarına ve çimento hamurunun rötresine bağlıdır. Hafif agregaların rijitliğinin normal agregalara göre daha düşük olmasından dolayı hafif betonların rötre değerleri normal betonlara göre daha fazladır (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif ince agregalarla üretilen hafif agregalı betonların rötre değerleri normal betonun yaklaşık 1 ila 1.5 katı iken, yoğunluğu daha yüksek ince agregalarla üretilen hafif betonların rötre değerleri normal betonunkiyle benzerdir. Sünme ve rötrenin aynı anda meydana gelmesi ile belki de sünme deformasyonunun rötrenin neden olduğu baskıyı azaltması, agrega gözeneklerinden zamanla su gelmesi ve hafif betonun daha iyi çekme deformasyon kapasitesine sahip olması nedeniyle rötre çatlakları hafif betonlarda nadiren görülmektedir (Newman, 2003). Fiber ilavesiyle çekme dayanımı artan hafif agregalı betonların rötre değerlerinde de azalma olmaktadır (Kayalı vd., 1999).

#### **2.6.2.9 Yorulması**

Yapılan kapsamlı bir deneysel çalışmada, yoğunluğu  $1500 \text{ kg/m}^3$ 'den fazla olan hafif betonların tekrarlayan basınç yükü altında normal betonlarla benzer yorgunluk hassasiyetine sahip olduğu görülmüştür (Tepfers ve Kutti, 1979). CEB (1988), tekrarlayan çekme gerilmeleri altında hafif betonun yorulma mukavemetinin normal betonla aynı veya biraz daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Bununla birlikte, çekme-basınç gerilme döngülerinde ise hafif betonun yorulma mukavemetinin normal ağırlıklı betona kıyasla genellikle biraz daha az olduğu belirtilmiştir.

#### **2.6.2.10 Su emmesi**

Herhangi bir agreganın ve bu agregadan üretilen hafif betonun su emme oranı öncelikle gözenek hacmine, agrega ve beton içerisindeki gözenek dağılımına, gözeneklerin

birbirleriyle bağlantılı olup olmadığına ve betonun yüzey yapısına bağlıdır (Newman, 2003). Betona nüfuz eden suyun betonun termik ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olması nedeniyle betonun daha az su emmesi istenmektedir. Hafif agregalar normal ağırlıklı agregalara göre daha boşluklu bir yapıya sahip olduklarından, hafif agregalarla üretilen hafif betonların su emme oranları normal betonlara kıyasla daha yüksektir. Ayrıca, hafif agregaların gözenek miktarının yanında gözenek yapıları da bu agregalarla üretilen betonların su emmeleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Topçu ve Uygunoğlu, 2007). Hafif agregaların büyük bir çoğunluğu normal agregalardan daha fazla su emer. Bundan dolayı hafif agregalar ile üretilen betonların su emme oranlarının normal betondan daha fazla olması beklenir. Fakat hafif agrega ile üretilen betonlarda agrega taneleri oldukça güçlü bir matrisle kaplandığında betonun su emme oranının çok fazla olmadığı gözlenmiştir. Bundan dolayı hafif beton ile normal betonun su emme oranları arasında fark beklenenden daha az olabilmektedir (Clarke, 1993). Kılcal su emme oranı, betonun dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Kılcal su emme oranı betonun boşluk hacmiyle doğru orantılı olmayıp çimento pastası-agrega ara yüzeyindeki veya agregadaki kılcal boşluklara bağlıdır (Uyan, 1975). Hafif betonlarda kullanılan hafif agregaların yapılarında ve beton harcında bulunan kılcal boşluklardan dolayı hafif betonların kılcallık katsayısı normal betonlara göre genellikle daha yüksektir (Uygunoğlu, 2008).

#### **2.6.2.11 Karbonatlaşması**

Yapısal hafif agregalı betonlarda normal betonlara göre genelde daha hızlı karbonatlaşma olduğu belirtilmiştir. Bu hız daha boşluklu hafif agregalarla üretilen betonlarda daha da artmaktadır. Hafif agregalar çoğu normal agregalara göre daha boşluklu ve geçirgen bir yapıya sahiptir. Daha boşluklu olan agregalar CO<sub>2</sub> ve diğer gazların difüzyonuna imkân tanımaktadır. Bunun için hafif agregalı betonlarda karbonatlaşmanın neden olabileceği donatı korozyonuna karşı ilave pas payı önerilmektedir. Ancak, hafif agregaların iyi kalitede çimento pastası ile korunması halinde, yapısal hafif agregalı betonların karbonasyon dirençlerinin normal ağırlıklı betonlarındaki ile benzer olacağı rapor edilmiştir. Bununla birlikte, hafif agregalı betonlarda çimento dozajının ve yoğun ince malzeme içeriğinin artışı ile birlikte karbonatlaşma derinliğinin azaldığı belirtilmiştir (Newman, 1993; Neville, 2000). Gemilerde, köprülerde ve viyadüklerde 15 yıldan 50 yıla kadar karbonasyona maruz kalan yapısal hafif agregalı betonların karbonasyon

dirençlerinin oldukça iyi olduğunu gösteren çalışmalar yapılmıştır (Holm, 1983; Holm vd., 1988; Ohuchi vd., 1984). Ayrıca, çimento dozajı  $400 \text{ kg/m}^3$ 'den fazla olan yapısal hafif agregalı (genleştirilmiş kil) betonların karbonasyon derinliklerinin normal betona benzer olduğu rapor edilmiştir (Mircea vd., 1994).

#### **2.6.2.12 Isıl özellikleri**

Gözenekli yapıya sahip olmalarından dolayı hafif betonlardaki ısı transfer hızı daha az olmaktadır. Normal betona kıyasla daha düşük ısıl genleşme katsayısına ve daha yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip olan hafif betonlar ısıl gerilmelerden dolayı daha az deformasyona uğrar. Bu nedenle hafif betonlar ısı yalıtımı sağlamak amacıyla yapı elemanları üretiminde kullanılmaktadır (Clarke, 1993). Hafif agregalı betonların termal özellikleri, onların daha çok yoğunluklarıyla, boşluk miktarı ve boşluk yapısıyla, betonlarda kullanılan agrega türüyle ve betonların matris yapısıyla ilgilidir (Topçu ve Uygunoğlu, 2007). Hafif agregalar genellikle gözenekli bir yapıya sahiptirler ve yapılarındaki gözenek miktarı ve gözenek dağılım şekilleri de agregaya göre farklılık göstermektedir. Bazı agregaların gözenekleri birbirleriyle bağlantılı iken bazılarının ise yarı açıktır. Ayrıca, gözenek miktarına göre agreganın yoğunluğu da değişmektedir. Yoğunlukları farklı olan hafif agregalarla üretilen betonların ısı iletkenlikleri de yoğunluklarıyla birlikte değişmektedir (Uygunoğlu, 2008). Isıl genleşme katsayısı, hafif betonların önemli termal özelliklerinden biridir. Hafif agregalı beton üretiminde kullanılan agregaların yoğunluğu meydana gelişleri sırasında ön ısıtmaya maruz kaldıklarından dolayı yüksek sıcaklık etkisinde çakıl veya kırma taş gibi fazla miktarda genleşmezler (Chandra ve Berntsson, 2002). Hafif agregaların normal agregalara göre sıcaklık etkisiyle genellikle daha az genleşmesinden dolayı bu agregalarla üretilen betonlar da normal betona kıyasla daha az genişirler. Bu nedenle hafif agregalı betonların ısıl genleşme katsayıları normal betona göre daha düşüktür (Shah ve Ahmad, 1994).

#### **2.6.2.13 Geçirimsizliği**

Geçirimsizlik, betonun dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür. Betondaki boşlukların miktarı, büyüklükleri ve sürekliliği geçirimsizliği etkiler. Hafif betonlar normal betonlara göre her zaman daha geçirimsiz değildir. Bunun nedeni de etrafı çimento pastasıyla sarılmış boşluklu hafif agregaların sınırlayıcı etkisinin normal agregaya göre

daha az olması, yüzey pürüzlülüğünden dolayı agrega-çimento pastası ara yüzeyinin daha güçlü olması, boşluklarında hapsolan suyun ilerleyen yaşlarda kür etkisi yapması ve hidrate olmamış çimento taneciklerinin hidratasyonuna neden olmasıdır. Daha az geçirimli hafif beton elde edilebilmesi için yoğun bir çimento pastası tabakası ile hafif agrega tanelerinin etrafının kaplanması uygun bir yöntem olabilmektedir.

#### **2.6.2.14 Gaz difüzyonu**

Hafif agregaların daha boşluklu bir yapıya sahip olmalarından dolayı gaz difüzyonu normal agregalara göre daha fazladır (Newman, 1993). Yapılan bir deneysel çalışmada, agrega boşluk hacminin artışı ile birlikte yapısal hafif betonun oksijen geçirgenliğinin de arttığı rapor edilmiştir. Ancak daha yoğun agregalarla üretilen yapısal hafif betonların oksijen geçirgenliğinin normal betona benzer olduğu gözlenmiştir (Real ve Bogas, 2017).

#### **2.6.2.15 Akustik özellikler**

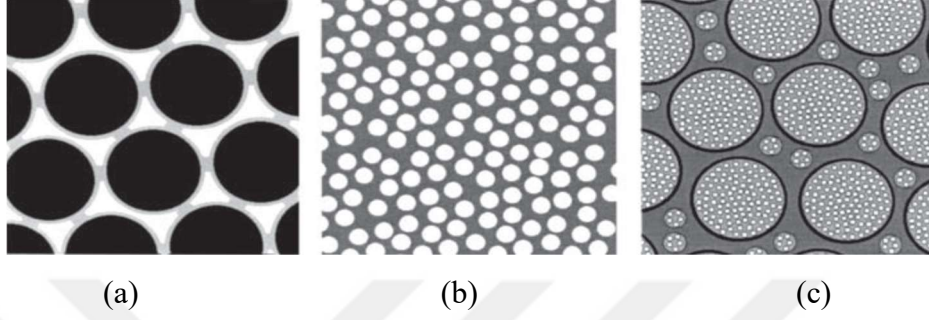
Hava yoluyla gelen ses enerjisi hafif agregada bulunan küçük boşluklarda ısı enerjisine dönüşür. Bundan dolayı hafif betonun ses yalıtım katsayısı normal betonun yaklaşık iki katıdır. Ancak buna rağmen hafif beton iyi ses yalıtım özelliği göstermez. Yoğunluk, yapı elemanlarının ses yalıtım özelliğini doğrudan ve doğru orantılı olarak etkileyen önemli bir özelliktir. Hafif betonun yoğunluğu geleneksel betona göre daha düşük olduğu için ses yalıtım açısından daha dezavantajlıdır. Bu nedenle normal beton yerine hafif beton kullanılarak üretilen yapı elemanları aynı ses yalıtımının temini için daha kalın tasarlanmalıdır (Clarke, 1993; Neville, 2000).

### **2.7 Hafif Betonların Sınıflandırılması**

#### **2.7.1 Üretim yöntemine göre hafif betonlar**

Hafif beton üretiminde en çok tercih edilen üç farklı yöntem vardır. Bunlardan ilki normal ağırlıklı agregaların tamamının veya bir kısmının yerine hafif agrega kullanılarak üretilen betonlardır. Bu betonlar normal agregaların tamamının ya da bir kısmının yerine hafif agrega kullanılmasıyla üretilebilir. İkincisi agrega olarak sadece iri agrega kullanılarak üretilen betonlardır. Bu betonlar (ince agregasız) iri agrega, bağlayıcı malzeme ve su

karışımının sıkıştırma işlemine tabii tutulmamış halidir. Üçüncü yöntem ise betonda çeşitli kimyasallarla boşluk oluşturularak elde edilmesidir. Bu yöntem ile elde edilen betonlara gaz, köpük veya hücreli betonlar da denilmektedir (Neville, 2000; Newman, 2003). Farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş hafif betonlar şematik olarak Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 2.6.** Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar (Newman, 2003)  
a:ince agregasız beton, b: gaz veya köpük beton, c:hafif agregalı beton

İnce agregasız beton üretilirken önce agregalar ıslatılır daha sonra çimento ve karışım suyu eklenir. Bu sayede agrega taneleri çimento pastası tabakası ile kaplanmış olur. Kaplanan agrega taneleri puntolar halinde birbirlerine bağlanır ve aralarında da boşluklar oluşur. Bu boşluklar nedeniyle düşük yoğunluğa, dayanıma ve rötreye sahip gözenekli bir beton elde edilmiş olur. Gaz beton ise genel itibariyle alüminyum tozunun ağırlıkça yaklaşık % 0.2 oranında çimento yerine ikame edilmesi suretiyle elde edilmektedir.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve alkalilerle reaksiyona giren alüminyum tozu çimento pastası içerisinde hidrojen kabarcıkları oluşturur. Atmosferik basınç altında buhar küreine tabii tutulan veya yüksek basınç altında 180 °C’de kür edilen betonun bünyesindeki gaz kabarcıklarının genişlemesi sayesinde istenilen düşük yoğunluklara ulaşılır. Bünyesinde en az %25 hava bulunan köpük beton ise önceden hazırlanmış köpüğün diğer malzemelerle karıştırılması veya sentetik ya da protein bazlı bir katkıının diğer karışım bileşenleri ile karıştırılması suretiyle elde edilir (Newman, 2003).

### **2.7.2 Birim ağırlık, dayanım ve kullanım amacına göre hafif betonlar**

TS EN 206:2013+A1 (2017), standardında hafif betonlar yoğunluklarına ve  $f_c$  değerlerine göre ayrı ayrı sınıflandırılmıştır. Bu sınıflamalar Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3’de verilmiştir. Çizelge 2.2’de eşdeğer en düşük karakteristik silindir ve küp  $f_c$  değerlerine göre hafif

betonlar 14 farklı sınıfta kategorize edilmiştir. En düşük  $f_c$  değerine sahip hafif betonu LC8/9, en yüksek  $f_c$  değerlerine sahip hafif betonu ise LC 80/88 olarak ifade edilmiştir. Çizelge 2.3’de ise hafif betonlar yoğunluklarına göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflamada hafif betonlar yoğunlukları  $800 \text{ kg/m}^3$  ile  $2000 \text{ kg/m}^3$  arasında her  $200 \text{ kg/m}^3$  de bir olmak üzere 6 ayrı kategoride tanımlanmıştır. Bu kategoriler birim ağırlık artışına göre sırasıyla D 1.0, D 1.2, D 1.4, D 1.6, D 1.8 ve D 2.0’dır. ACI 213R-87 (1987), hafif betonları yoğunluklarını ve  $f_c$  değerlerini esas alarak üç ana gruba ayırmıştır. Bunlardan ilki yoğunluğu  $1350$  ile  $1900 \text{ kg/m}^3$  arasında olan (ACI 213R-03 te  $1120$  ile  $1920 \text{ kg/m}^3$  olarak revize edilmiştir) ve en az  $17 \text{ MPa}$   $f_c$  değerine sahip olan yapısal hafif betondur. İkincisi  $300$  ile  $800 \text{ kg/m}^3$  arasında yoğunluğa sahip olan, termal iletkenlik katsayılarının düşük olmasından dolayı genelde ısı izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılan yalıtım betonudur. Üçüncüsü ise  $f_c$  değeri  $7$  ile  $17 \text{ MPa}$  arasında değişen, ısı yalıtımı bakımından ilk iki grup arasında olan ve dolgu amaçlı kullanılan yarı taşıyıcı-yalıtım betondur.

**Çizelge 2.2.** Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları (TS EN 206:2013+A1, 2017)

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı, $f_{ck,sil}$ (MPa)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı, $f_{ck,küp}$ (MPa)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

RILEM (1978)’de, hafif betonlar ACI 213R-87 (1987)’deki sınıflama gibi üç ana gruba ayrılmıştır. Ancak yoğunluk,  $f_c$  ve ısı iletkenlik katsayısının esas alındığı bu sınıflamada sınır değerler ACI 213R-87 (1987)’deki değerlerden biraz daha farklıdır. Yapısal, yapısal ve yalıtım ve de yalıtım olarak nitelendirilen hafif betonların  $f_c$ , termal iletkenlik ve yoğunlukları için sınır değerler belirlenmiştir. Bu sınır değerler Çizelge 2.4’te verilmiştir.

**Çizelge 2.3.** Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması  
(TS EN 206:2013+A1, 2017)

Yoğunluk Sınıfı	D 1.0	D 1.2		D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Yoğunluk Aralığı (kg/m <sup>3</sup> )	≥800 ve ≤1000	>1000 ve ≤1200		>1200 ve ≤1400	>1400 ve ≤1600	>1600 ve ≤1800	>1800 ve ≤2000

**Çizelge 2.4.** RILEM'e göre hafif beton sınıfları (RILEM, 1978)

Özellik/Hafif beton türü	Yapısal	Yapısal/Yalıtım	Yalıtım
Basınç Dayanımı (MPa)	>15	>3.5	>0.5
Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)	-	<0.75	<0.3
Yaklaşık yoğunluk aralığı(kg/m <sup>3</sup> )	1600-2000	<1600	<<1450

ASTM C330/C330M (2014) standardında tamamında hafif agregalar kullanılan veya doğal kum ve hafif agreganın karışımı ile üretilen yapısal hafif betonun sahip olması gereken 28 günlük hava kurusu yoğunluğunun maksimum değeri ile 28 günlük minimum çekme ve  $f_c$  değerleri Çizelge 2.5'de sunulmuştur. ASTM C330/C330M (2014) standardında hafif betonun hava kurusu yoğunluğu 1840 kg/m<sup>3</sup> ile sınırlandırılırken, bu yoğunluğa sahip betonun  $f_c$  değerinin en az 17 MPa olması gerektiği rapor edilmiştir. Ayrıca, sadece hafif agregalarla üretilen hafif betonların hava kurusu yoğunluğunun da en fazla 1760 kg/m<sup>3</sup> olması gerektiği bildirilmiştir.

### 2.7.3 Kendiliğinden yerleşen hafif betonlar

Hafif beton, yapının ölü yükünün azaltılması için mükemmel bir çözümken kendiliğinden yerleşen hafif beton da dökümü kolaylaştırır ve yapım problemlerini ortadan kaldırır. Hafif yapısı ve kolay yerleştirilebilirliği göz önüne alındığında, kendiliğinden yerleşen hafif betonlar ince ve ağır yapı elemanlarının artan yapım zorlukları için bir çözüm olabilir. Kendiliğinden yerleşen hafif beton karışım bileşenlerinin özellikleri ve miktarlarının farklılaşmasına karşı oldukça hassastır. Bu nedenle kendiliğinden yerleşen hafif beton üretimi için iyi bir kalite kontrole ihtiyaç vardır. Taze haldeki betonun akış kabiliyetinin sağlanması ve segregasyona uğramamış düşük yoğunluklu sertleşmiş beton

elde edilmesi, kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmek için yapılan hemen hemen tüm yayımlanmış çalışmalarda rapor edilen ortak bir sorundur (Vakhshouri ve Nejadi, 2016).

**Çizelge 2.5.** Yapısal hafif betonun sahip olması gereken kriterler  
(ASTM C330/C330M, 2014)

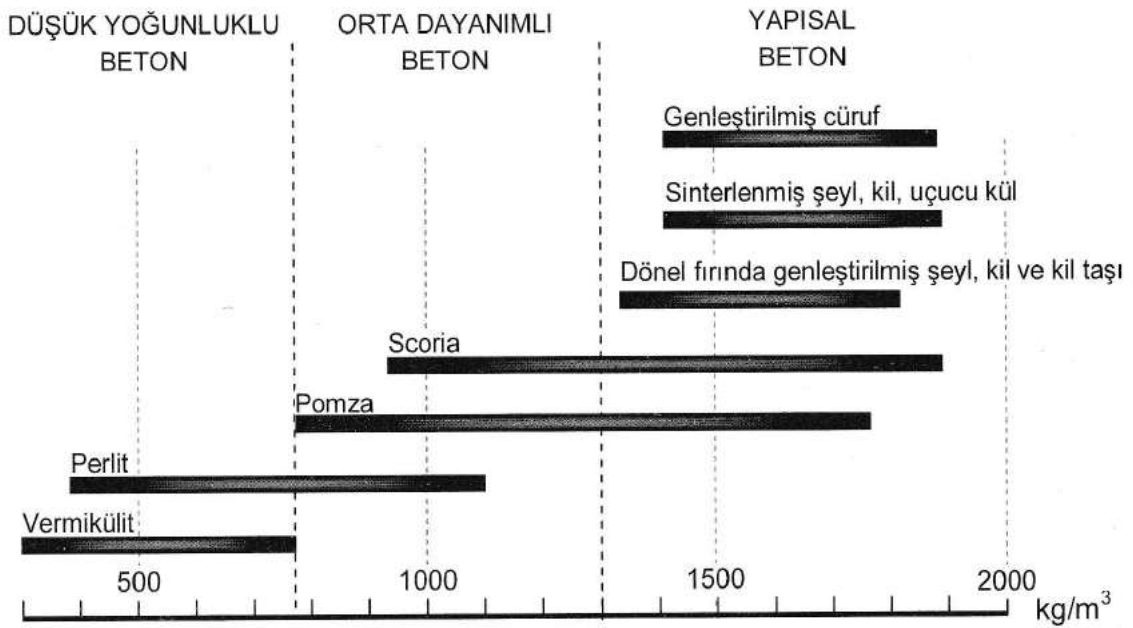
28 Günlük Maksimum Hava Kurusu Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	28 Günlük Minimum Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	28 Günlük Minimum Basınç Dayanımı (MPa)
Sadece Hafif Agregalar ile Üretilen		
1760	2.2	28
1680	2.1	21
1600	2.0	17
Doğal kum ve Hafif Agregalar karışımı ile Üretilen		
1840	2.3	28
1760	2.1	21
1680	2.1	17

## 2.8 Hafif Beton Yapımında Kullanılan Agregalar

TS EN 13055 (2016) ve TS EN 206:2013+A1 (2017) standartlarına göre tane yoğunluğu en fazla 2000 kg/m<sup>3</sup> olan veya gevşek yığın yoğunluğu maksimum 1200 kg/m<sup>3</sup> olan agregalara hafif agregalar adı verilir. Doğal ya da yapay olabilen hafif agregaların en belirgin özellikleri boşluklu yapılarıdır. Hafif beton üretim yöntemlerinin en çok tercih edileni normal agregalar yerine kısmen veya tamamen hafif agregalarla ikame edilmesiyle hafif agregalı beton elde edilmesidir. Hafif agregalar, normal agregalara göre betonun ölü ağırlığını azaltması, yüksek izolasyon katsayısı ve yüksek ses sönümlenme kalitesi gibi üstün bazı fiziksel özellikleri nedeniyle betonda kullanımı popüler hale gelmiştir. Hafif agregalar aslında yeryüzünden çıkarılan doğal kaynaklardan elde edilmekteydi, fakat artan hafif agregalar talebi nedeniyle doğal kaynaklar tükenme noktasına geldi. Bu amaçla bir alternatif olarak doğada yaygın halde bulunan kayalar ve mineraller yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak veya başka yöntemlerle yapay hafif agregalar üretilmektedir. Modern yapay hafif agregalarla normal ağırlıklı betonla kıyaslanabilecek derecede yüksek  $f_c$  değerine sahip hafif betonlar üretilmektedir. Ayrıca, endüstrileşmenin bir sonucu olan aşırı miktardaki atık maddelerin hafif agregalar üretimi için potansiyel bir ham madde olup olmayacağı hususunda araştırmalar yapılmaktadır. Bu tür atık kaynaklardan elde edilen yapay agregalar geri dönüştürülmüş yapay hafif



agregalar olarak tanımlanmaktadır (Jo vd., 2007). Hafif betonların içeriğindeki agrega türlerine göre sahip olabileceği yoğunluğa ve  $f_c$  değerlerine göre yapısal, yalıtım (düşük yoğunluklu), ve yarı taşıyıcı/yalıtım (orta dayanımlı) olmak üzere üç farklı gruba ayrılan hafif beton türlerinden hangisine ait olabileceğini gösteren bir çalışma Şekil 2.7’de sunulmuştur (ACI 213R-87, 1987). Yapılan bu çalışmaya göre yapay agregalar genel itibariyle yapısal hafif beton üretiminde doğal agregalara göre daha elverişlidir. Doğada farklı kimyasal içerikleri ile bulunan doğal hafif agregalarla bu üç farklı türde de hafif beton üretilebilmektedir.



Şekil 2.7. İçeriğindeki agrega türüne göre hafif betonların sınıflandırılması (Baradan vd., 2012)

### 2.8.1 Doğal hafif agregalar

Doğal agregalar, mekanik işlem dışında başka bir işlemde geçirilmemiş olan ve mineral kaynaklardan elde edilen agregalardır. Oluşumları esnasında gözenekli bir yapı kazanmış olan agregalardır. Doğal hafif agregalar volkanik kökenli veya volkanik kökenli olmayan hafif agregalar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Volkanik kökenli olan agregalar, lavın volkandan aşağı inerken havayla temasından dolayı aniden soğuması sonucu matlaşır. Bu nedenle kristalize bir yapıya sahip olmayıp, yapıları düzensizdir. Bu tip hafif agregalar amorf veya camsı bir yapıya sahiptirler (Uygunoğlu, 2008).

### 2.8.1.1 Pomza

Pomza; boşluklu, süngerimsi, volkanik hadiseler sonucu oluşmuş, fiziksel ve kimyasal dayanıklılığı iyi, boşluklu yapıda ve camsı bir kayadır. Pomza, oluşumu sırasında içerisindeki gaz kabarcıklarının çok hızlı bir şekilde bünyesinden ayrılması ve hızlı soğuması sebebiyle, yapısında çok fazla sayıda gözenek barındırır. Pomzanın yapısındaki gözeneklerin birbirleriyle genellikle bağlantısız olması ve bu boşlukların çok fazla sayıda olması nedeniyle pomza, düşük geçirimsizlik ve yüksek izolasyon kapasitesine sahiptir. Pomza bu özelliği ile kış mevsiminde soğuğa, yaz mevsiminde ise sıcağa karşı iyi izolasyon sağlar (Gündüz vd., 1998). Pomza, oluşum şekline göre bazik ve asidik pomza olmak üzere iki gruba ayrılır. Asidik pomza bazik pomzaya göre daha yaygındır. Asidik pomzanın yoğunluğu  $0.5 \text{ g/cm}^3$  ile  $1 \text{ g/cm}^3$  arasındadır. Kirli beyaz ve beyaz renklidir. Sertliği Mohs skalasına göre 5 ile 6 arasındadır. Bazik pomzanın yoğunluğu ise  $1 \text{ g/cm}^3$  ile  $2 \text{ g/cm}^3$  arasındadır. Genellikle siyah veya kahverengi renklidir. Mohs sertliği ise 5 ile 6 arasındadır (Yazıcıoğlu vd., 2003; Dolğun, 2010). Asidik pomzalarda silis içeriği daha fazladır. Ayrıca, asidik pomza inşaat sektöründe bilhassa briket imalatında kullanılmaktadır. Bazik pomzalarda ise kalsiyum, demir, magnezyum ve alüminyum elementleri daha yoğun olarak bulunmaktadır. Bazik pomza, inşaat sektöründen ziyade, diğer endüstri dallarında kullanılabilir (Şengün, 2004). Yapılan çalışmalarda hafif beton üretiminde pomzanın kullanılabilirliği, ancak hafif beton özelliklerine ve standartlara uygunluk açısından belirli boyutlarda olması gerektiği rapor edilmiştir (Yıldırım, 2007).

### 2.8.1.2 Volkanik tüf

Tüfler, volkan patlamalarında çoğunlukla katı olarak püskürtülen, farklı büyüklüklerdeki malzemelerin birikmesiyle meydana gelen volkanik ve tortul kayalara benzeyen kayalardan oluşmaktadırlar (Çobanoğlu vd., 2003). Tüfit, tüfün tane boyutu daha büyük olan halidir. Her ikisi de silis içerikli, açık renkli volkanik cam olarak nitelendirilebilir (Demir, 2001). Tüflerin yapısında önemli oranlarda gaz boşlukları bulunur. Yarı erimiş durumdaki lavın parçalanmasına neden olan hızlı soğuma hadisesi sırasında geniş gazlar tüfün yapısındaki gaz boşluklarını oluşturur (Uygunoğlu, 2008). Bileşiminde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{FeO}_3$  bileşiklerinin toplam oranı genellikle %70'den fazladır. Az miktarda da  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$  ve nem içeren tüflerin kimyasal yapıları buldukları ortama göre değişkenlik

göstermektedir. Ortalama erime sıcaklığı 1343 °C olan tüflerin sertliği Mohs skalasına göre 5,5 ile 6 arasındadır. Tüflerin  $f_c$  değerleri genellikle 95 kg/cm<sup>2</sup> ile 130 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir. Tüfler inşaat sektöründe çoğunlukla briket üretiminde, çimento trası olarak, aşındırıcı olarak, yapı taşı olarak ve hafif beton agregası olarak kullanılmaktadır (Ergül, 2009).

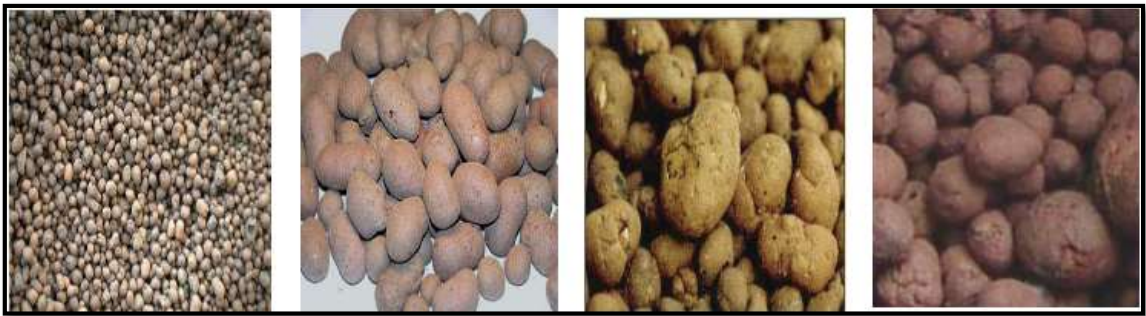
### 2.8.1.3 Diatomit

Diatomitler, diatom denilen tek hücreli taze su bitkilerinin fosilleşmiş iskeletlerinin oluşturduğu tortul kayalardır (Ergun, 2011). Amorf silissi bir yapıda olan diatomitin tane iriliği 2 µm ile 200 µm arasındadır. Doğada farklı biçimlerde görülebilen diatomit, en çok uzun balık veya yuvarlak tepsi şeklinde görülür. Çoğunlukla beyaz, gri, bej ve açık sarı renkte olan diatomitlerin organik malzemece zengin olanları kahverengi, yeşil veya siyaha yakın renkte olabilmektedirler (Aruntaş, 1996). Diatomlar petek şeklinde dizilmiş silisli yapıları sayesinde; yüksek geçirgenlik, yüksek soğurma kapasitesi, düşük ısı iletkenliği, düşük yoğunluk, küçük parçacık boyutu, geniş yüzey alanı, kolay öğütülebilirlik gibi özelliklere sahiptir (Ergun, 2011). Doğada çok fazla çeşidi olan diatomitin standart bir kimyasal bileşimi yoktur. Diatomitin yapısında genellikle %70 ile %90 arasında SiO<sub>2</sub> bulunmaktadır. Diatomitin erime noktası kimyasal yapısına göre 1000 °C ile 1590 °C arasında olmaktadır. Diatomitin  $f_c$  değeri 3 kgf/cm<sup>2</sup> ile 18 kgf/cm<sup>2</sup> arasında değişmektedir (Aruntaş, 1996). Diatomit, volkanik kökenli olmayan tek doğal puzolandır. Diatomit kayacının Mohs sertliği 1.5 civarında olup tanelerin sertliği ise 4 ile 6.5 arasındadır. Diatomit tanelerinin yoğunluğu 1900 kg/m<sup>3</sup> ile 2400 kg/m<sup>3</sup> arasında iken, diatomitin etüv kurusu yoğunluğu 400 kg/m<sup>3</sup>'e kadar düşmektedir. Diatomitin porozitesi %90'a kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle ham diatomit, ağırlığının 3 katı ile 4 katı arasında, kalsine diatomit ise 5 katı ile 10 katı arasında su emebilir. Hidroflorik asit dışında diğer asitlerde çözülmez ve genellikle kimyasal reaksiyonlara ilgisizdirler. Kimyasal olarak inert olması ve steril özelliği sayesinde filtrasyon amaçlı kullanılmaktadır. Isı, ses izolasyonu ve elektrik yalıtımı oldukça iyidir (Bentli, 2009; Bentli, 2010).

## 2.8.2 Doğal malzemelerden elde edilen yapay hafif agregalar

### 2.8.2.1 Genleştirilmiş kil, şeyl ve arduvaz

Genleştirilmiş kil, şeyl ve arduvaz agregaları uygun hammaddelerin döner fırınlarda ısıtılması ile viskoz piropplastik kütledeki gazların oluşumu ile bu hammaddelerin genişmesi sonucu elde edilir. Meydana gelen boşluklu yapı soğuma esnasında korunur ve yeni oluşan genleştirilmiş yapay malzeme doğal hammaddeye göre çok daha düşük yoğunluğa sahip olmuş olur (Neville, 2000). Yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldığında gaz baloncukları çıkararak gözenekli yeni bir içyapı oluşturan killere genişen kil adı verilir. Genleşen killerin döner fırınlarda 1000 °C ile 1300 °C arasındaki sıcaklıklarda pişirilmesiyle bünyelerindeki gazlar açığa çıkar. Bu pişirme işlemiyle killer boşluklu bir yapıya dönüşür ve bu işlemle elde edilen agregalara genleştirilmiş kil agregası denir. Genleştirilmiş kil agregalarının hacmi üretildikleri killerin hacimlerine göre 1.5 kat ile 6 kat arasında daha fazla olmaktadır. Genleştirilmiş kil agregaları ani sıcaklığa maruz kalmalarından dolayı sinterlenmiş sert bir dış kabuğa sahiptirler (Devecioğlu ve Biçer, 2012). Bu sinterlenmiş sert kabukları sayesinde genleştirilmiş kil agregaları oldukça yüksek  $f_c$  değerlerine sahiptir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle kilin bünyesinden açığa çıkan gazların yerlerinde bıraktığı küçük ve kapalı boşluklar hücresel homojen bir içyapı oluşturur (Doruk, 1974). Genleştirilmiş kil agregasının genel görünümü Fotoğraf 2.2’de verilmiştir. Doğada genişme özelliği bulunan killerden elde edilen genleştirilmiş killer doğada genişmiş halde bulunmazlar (Seyhan, 2001).



**Fotoğraf 2.2.** Genleştirilmiş kil agregasının görünümü (Gündüz vd., 2006)

Doğadaki her kilin genişme özelliği yoktur. Genleştirilmiş kil agregası elde edebilmek için kullanılan genişen killer genel olarak kumlu kil, erken sinterleşen kil, killi şeyl, şist

ve şifertondur (Seyhan, 2001). Genleşme miktarı ısıtma işlem süresine ve sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle farklı tane büyüklüğüne ve  $300 \text{ kg/m}^3$  ile  $800 \text{ kg/m}^3$  arasında olmak üzere farklı yığın yoğunluğa sahip yapay agregalar elde edilir (Chandra ve Berntsson, 2002). Genleştirilmiş killer, hafif beton agregası olarak kullanımı dışında; tuğla ve sıva yapımında, seralarda bitki toprağı yerine, atık suları filtrelemede, asfalt yol yapımında ve dolgu amaçlı kullanılmaktadır (Devecioğlu, 2012).

### **2.8.2.2 Genleştirilmiş perlit**

Genleştirilmiş perlit, yapılarda hem ses, ısı yalıtımı ve hem de ekonomik yararlar sağlayan hafif bir malzemedir. Perlit, riyolitik veya dasitik magmanın bir formu olan pomzadan elde edilir ve bünyesinde %2 ile %5 arasında su bulunur. Hızlı ısıtmaya tabii tutulan perlit, düşük yoğunluğa sahip hücreli yapıya sahip bir malzeme oluşturur.  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  ile  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkları arasında ısıtılan perlit kayacının içinde kaynayan kimyasal sudan meydana gelen buharın bu sıcaklıklarda yumuşamış bir durumda olan perlit kayasının içinde kabarcıklar oluşturması ile köpük benzeri bir yapı oluşur. Bu kabarcıkların oluşumu neticesinde perlitin kendi orijinal hacminden 15 ile 20 kat arasında daha büyük bir hacme sahip olan genleştirilmiş perlit oluşur. Genleştirilmiş perlit agregası, tuğla, sıva, boru, duvar ve döşeme bloğu gibi yapı elemanlarında kullanılmaktadır. Ancak, beton üretiminde endüstriyel olarak henüz kullanılmamaktadır. Dünyadaki toplam rezervi 6.6 milyar ton olan perlit rezervinin yaklaşık 4.5 milyar tonu Türkiye’de bulunmaktadır. Yüksek binalar çoğu durumda betonun yüksek birim ağırlığı nedeniyle depremden etkilenmiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının normal agregaya yerine betonda kullanımı ile genleştirilmiş perlit agregasının hafif yapısı sayesinde depremde oluşabilecek hasarlar azaltılabilir. Birçok çalışmada, genleştirilmiş perlit agregası çimento katkısı olarak veya beton içerisinde agregaya olarak kullanılmıştır. Betonda daha çok ince agregaya yerine istenilen  $f_c$  değerine göre farklı yer değiştirme oranlarında kullanılmıştır. Perlitin öğütmek çimento klinkerini öğütmekten daha kolay olduğu için perlit katkılı çimento üretimi ile ekonomik yarar sağlanabilmektedir. Perlit katkılı çimentoların erken yaşlardaki dayanımı düşük iken, ileriki yaşlarda meydana gelen puzolanik reaksiyonlar sayesinde dayanımda artış olmaktadır (Topçu ve Işıkdag, 2008).

### 2.8.2.3 Genleştirilmiş polistren sert köpük

Sentetik bir malzeme olan genleştirilmiş polistren sert köpük, ham petrolden imal edilen bir hidrokarbondur. Genleştirilmiş polistren sert köpüğün %98'i havadan oluşmaktadır. Bu malzeme, stiren monomerinin polimerizasyonu ile elde edilir. Bu polimerizasyon işleminde peroksit katalizör olarak, pentan ise şişirme maddesi olarak kullanılır. Durgun hava, genleştirilmiş polistren sert köpüğün yapısındaki çok fazla sayıdaki gözenekli hücrelerde hapsolmuş durumdadır. Bir m<sup>3</sup> genleştirilmiş polistren sert köpük bünyesinde 3 ile 6 milyar arasında gözenekli küçük hücre barındırır. Bu hücrelerin varlığı, ses ve ısı izolasyonu sağlar. Yapısının önemli bir bölümü havadan oluştuğu için çok hafif bir malzemedir. Hafif olduğu için de taşınması oldukça kolaydır. Genleştirilmiş polistren sert köpüğün parlama noktası 360 °C civarındadır. Genleştirilmiş polistren sert köpüğün kendiliğinden yanabilmesi için ortam sıcaklığının yaklaşık 490 °C'ye yükselmesi gereklidir. Bununla birlikte, genleştirilmiş polistren sert köpüğün yanması ile açığa çıkan gazların miktarı, ahşabın yanmasıyla açığa çıkan gazların miktarından azdır (Gündüz, 1998). Genleştirilmiş polistren sert köpük çözülmez ve erimez yapıya sahip bir malzeme olduğu için, malzemenin gözenekleri arasında bulunan duvarları da su geçirmez. Akışkan haldeki suyu emmemesi durumuna karşılık genleştirilmiş polistren sert köpük, buhar difüzyonu ile havadaki nemi bünyesine alabilir. Bünyesine aldığı bu su buharı soğuduğunda ise yoğunlaşma meydana gelir ve buhar akışkan suya dönüşür. Malzemenin buhar difüzyonu yoluyla su alması, buhar kesici maddeler kullanılarak azaltılabilir (Yazıcıoğlu vd., 2003). Granüle edilmiş vaziyette olan genleştirilmiş polistren sert köpük beton agregası olarak kullanılmaktadır.

### 2.8.2.4 Genleştirilmiş vermikülit

Sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak tanımlanan vermikülit, genişleyen mika grubu minerallerini de içine alan farklı bir mineralojik grubu ifade etmektedir. Vermikülit, doğada sarılı kahve, siyah ve yeşil renkte olabilmektedir. Özgül ağırlığı 2.5 g/cm<sup>3</sup> civarında olan vermikülitin mohs sertliği ise 1.2 ile 2.0 arasında değişmektedir. Ani yüksek sıcaklığa maruz kalan vermikülitin yığın yoğunluğu genişleme nedeniyle yaklaşık olarak 10 kat azalmaktadır (DPT, 2001). Yaklaşık 900 °C ile 1000 °C'de ani ısıtma işlemine tabi tutulan vermikülit yapraklar halinde ayrışır ve küçük kurtçuklara benzer bir hal alır. Vermikülitin ısı işlem sonrası aldığı bu yeni hale genleştirilmiş vermikülit adı

verilir (Toksoy, 1997). Ham şekilde kullanımı kısıtlı olan vermikülitin genişletilmiş hali ses ve ısı yalıtımının önemli olduğu yerlerde Portland çimentosu ile birlikte hafif yapı malzemelerinin üretiminde, dökümhane ve çelik fabrikalarında ateşe dirençli muhafaza elemanı yapımında, dolgu işlerinde, yapılarda ateşe dayanıklı panel ve bölme duvar üretiminde, erimiş metalin üzerinin örtülmesinde, erimiş malzemeyi paketlemede, sıcak boruların yalıtımında, tarımda gübre olarak, yangına dayanıklı sıva yapımında, havuzlarda yalıtımı sağlamak amacıyla, otomotiv sektöründe ve petrol sanayinde sondaj çamuru olarak kullanılmaktadır (Toksoy, 1997; Evans, 1993).

### **2.8.3 Endüstri atığı veya yan ürünü olan hafif agregalar**

#### **2.8.3.1 Yüksek fırın cürufu**

Demir cevheri bünyesindeki demiri ayırabilmek amacıyla cevher yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılır. Yüksek fırınlarda yakıt olarak genellikle kok kömürü kullanılır. Ayrıca, kalker taşı da arıtma işleminde yardımcı malzeme olarak kullanılır. Redüksiyon işlemi neticesinde, demir oksitte bulunan oksijen ile kok kömüründeki karbon birleşerek karbon monoksit ve karbondioksit olarak havaya karışır. Geriye eriyik halde bulunan demirin yanı sıra kok kömürünün külü, kireç, alümin, silis ve diğer yabancı maddelerden oluşan cüruf denilen malzeme kalır. Demir eriyiğinin üst bölümünde biriken cüruf yan ürün olarak ayrılır ve geriye yalnızca demirin kalması sağlanmış olur (Sandor, 1992). Geleneksel çelik imalat yöntemleri sonucu açığa çıkan cüruflar kristal yapıdaki atık malzemelerdir. Cüruf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal bir yapı kazanmış olur. Kristal yapıdaki haliyle cürufun mekanik özellikleri bazalta benzemektedir. Cüruf, bu şekliyle ya kullanılmazlar ya da beton agregası veya yol malzemesi olarak kullanılırlar (Tokyay ve Erdoğdu, 2002).

#### **2.8.3.2 Uçucu kül**

Endüstriyel yakıt olarak ve konutlarda ısıtma amacıyla kullanılma imkânı olmayan düşük kalorili kömürler enerji hammaddesi olarak termik santrallerin çoğunda elektrik enerjisi üretiminde pulvarize biçimde kullanılmaktadır. Kömürün yanması neticesinde kömür külleri ve yanmayan kalıntı gibi atıklar ile birlikte çeşitli gazlar açığa çıkar. Küllerin yaklaşık %75'i gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenirken, kazan altı külü veya

cürufu denilen kısmı ocak tabanında birikir. Gazlarla birlikte bacadan dışarıya sürüklenen küller bacadan çıkmadan elektrostatik filtreler veya elektromekanik yöntemler ile tutulur ve stoklanır. Bu küllere de “UK” veya “pulverize yakıt külü” adı verilir (Baradan vd., 2012). Betonda ince agreganın bir kısmı yerine UK ikame edilerek bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan olumlu sonuçlar elde edilmiş ve UK malzemesinin betonda ince agreganın bir kısmı yerine kullanılabileceği rapor edilmiştir. Ayrıca, yüksek oranda UK ile birlikte düşük oranda Portland çimentosu içeren bir karışımdan üretilen iri hafif agregaların taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılabileceği belirtilmiştir (Alkaya, 2002).

## **2.8.4 Endüstri atıkların işlenmesiyle elde edilen hafif agregalar**

### **2.8.4.1 Genleştirilmiş cüruf**

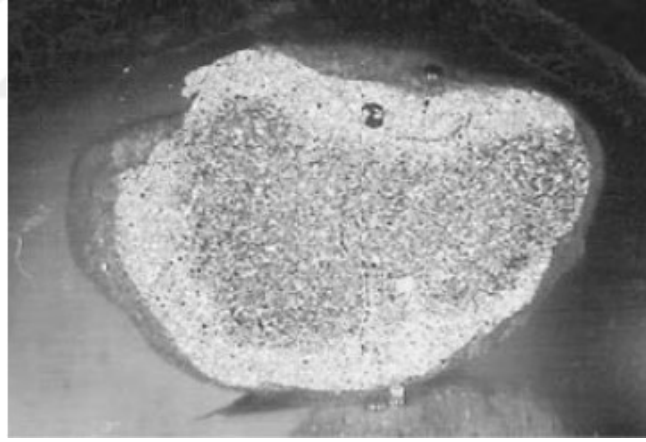
Yüksek fırınlarda yaklaşık 1400 °C ile 1600 °C arasında sıcaklıkta ısıtılan demir cürufunu fırından çıkarıldıktan sonra soğutmak için çeşitli yöntemler tercih edilmektedir. Soğutma yöntemi cürufun iç yapısını önemli derecede etkiler. Eriyik haldeki cürufu soğutmak için en çok tercih edilen yöntem ani olarak bol suda soğutmaktır. Bu yöntem ve diğer hızlı soğutma teknikleri ile soğutulan cüruf granül hale gelir ve amorf bir yapı kazanır. Bu sayede de beton ve çimento üretiminde kullanıma uygun hale gelir. Kontrollü bir şekilde su ile soğutulan cürufun içerisine buhar hapsoldüğü için boşluklu bir yapı elde edilmiş olur. Bu boşluklu yapıya da genleştirilmiş veya köpürtülmüş cüruf adı verilir. Gözenekli yapıdaki genleştirilmiş cüruflar kırılarak hafif agrega haline getirilir ve hafif beton üretiminde kullanılır. Diğer bir soğutma yöntemi olan havada soğutma tercih edilir ise, cüruf yavaş soğutmadan dolayı kristal ve sert bir yapıya sahip olur. Bu şekilde soğutulan cüruflar konkasörlerle kırıldıktan sonra beton agregası olarak kullanılabilir. Ancak havada soğutulan cürufun yapısında çok fazla kükürt bulunduğu için betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler (Sandor, 1992).

### **2.8.4.2 Yapay uçucu kül agregaları**

UK topraklarının sertleştirilip agrega haline getirilmesi amacıyla en çok kullanılan yöntemler sinterleme, soğuk bağlama ve otoklavlamadır. Soğuk bağlama, UK malzemesinin normal sıcaklıklarda  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyonu sonucu suya dayanıklı



bağlayıcı malzeme elde edilmesini sağlayan bir bağlama türüdür. UK, Portland çimentosu ve su kullanılarak üretilen peletlenmiş veya sıkıştırılmış malzemedan agrega elde etmek için bu malzeme birkaç gün kür edilir. Otoklavlama ile UK agregası, UK topraklarının basınçlı doymuş buhar kürüne maruz bırakılması suretiyle elde edilir. Otoklavlanmış UK agregası üretilmesi için tipik olarak % 47 UK, % 45 kuvars kumu, % 4.5 kireç, % 1.5 su ve % 2.0 oranında katkı maddelerinden oluşan bir karışım kullanılır. Bu karışımın tamamı peletlenir ve yüksek nem ortamında ısıtılır, daha sonra 6.5 saat boyunca 200 °C de ısıtılır ve böylece hafif agrega elde edilmiş olur. Sinterleme işlemi UK taneciklerinin ortak temas noktalarının birlikte eritilmesiyle peletlerin sertleştirilmesi olarak ifade edilir. Sinterlenmiş UK agregalarının üretilmesi iki ana işlemle olur. İlk işlem, bir su-UK bulamacının dönen bir kap içine püskürtülmesi ve hareket eden bir ızgara üzerinde topaklanmış hale getirilmesidir. İkinci işlem ise 1050 °C ile 1250 °C arasında bir sıcaklıkta bu topaklanmış parçacıkların yakılmasıdır (Koçkal, 2008). Sinterlenmiş UK agregalarının özgül ağırlıkları genellikle 1000 kg/m<sup>3</sup> ile 1200 kg/m<sup>3</sup> arasında olmaktadır (Duran, 2003). Genleştirilmiş UK agregasının içyapısı Fotoğraf 2.3’de sunulmuştur.



**Fotoğraf 2.3.** Genleştirilmiş uçucu kül agregası (Alexander ve Mindess, 2010)

### **2.8.5 Organik kökenli hafif agregalar**

Son zamanlarda organik atıkların hafif betonlarda agrega olarak kullanılabilirliği üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu organik atıklar hafif beton üretiminde hem betonun üretim maliyetini düşürmek hem de ekolojik yarar elde etmek için kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarda hafif beton üretiminde çeşitli bitkisel atıklar kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Ayçiçeği sapı, çeltik sapı, çeltik kavuzu, ağaç kabuğu, talaş vb.

organik atıklar hafif beton üretiminde kullanılabilir malzemelerdir (Alkaya, 2010). Talaş, yıllardır kiremit gibi ürünlerin üretiminde hafif agrega olarak kullanılmaktadır. Ham talaşın bünyesinde şeker, tanin ve çeşitli organik bileşikler bulunduğu için Portland çimentosunun priz süresini, hidrasyonu ve dayanıklılığını olumsuz etkiler. Bu zararlı etkilere karşı önlem alınmalıdır. Ayrıca ahşap parçacıkları betonda su alıp şişeceğinden çatlaklara neden olabilmektedir (Alexander ve Mindess, 2010).

## **2.9 Hafif Betonun Dayanıklılığı**

Hafif agregalı betonlarda ince malzeme miktarı, agrega boşluk yapısı, agrega tipi gibi karışım oranlarını etkileyen birçok faktör olmasından ve kür koşullarından dolayı bu betonların dayanıklılığı karmaşık bir problemdir. Örneğin, düşük su çimento oranı ve kuru boşluklu bir agrega tipi ile üretilen hafif agregalı betonda agregalar hidrasyon için gereken suyu da emebilir ve betonda istenilen dayanım ve dayanıklılığa ulaşamayabilir. Ayrıca bazı durumlarda, tamamen suya doygun agregalarla üretilen hafif betonların agrega ile çimento pastası ara yüzeyinde de zayıflama olabilmektedir. Boşluklu agregaların nem durumunun belirlenmesi ve karışım oranlarında bu nem oranının bilinmesi hafif agregalı betonların dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır (Kucharczyková vd., 2010).

### **2.9.1 Kimyasal etkilere dayanıklılığı**

Hafif agregaların çoğunluğu oluşumları sırasında yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları için kimyasal etkilere karşı kararlı bir yapıdadır. Taşıyıcı hafif betonlarda hafif agregalar ile birlikte normal agregaların da kullanıldığı durumlarda özellikle normal agregaların kimyasal reaktivitesinin deneylerle kontrol edilmesi gereklidir. Hafif agregaların çimento matrisinde bulunan serbest suyu emmesi ve hafif betonların genellikle yüksek çimento içeriğine sahip olması geçirimsizliği ve dolayısıyla kimyasal dayanıklılığı artıran etmenlerdir (Clarke, 1993).

### **2.9.2 Donma-çözülme etkisine dayanıklılığı**

Hafif betonların donma-çözülme dayanıklılığı ağırlıklı olarak karışım oranlarına, nem içeriğine, sürüklenmiş hava miktarına ve agrega tipine bağlıdır. Yapılan bazı çalışmalar

hava sürüklenmemiş hafif agregalı betonların donma-çözülme dayanıklılığının hava sürüklenmemiş normal agregalı betonlara göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Betonda kullanılmadan önce ıslatılmış hafif agregalarla üretilen hava sürüklenmiş betonların donma-çözülme dayanıklılığının aynı koşullarda normal agregalarla üretilen normal ağırlıklı betonlarla yaklaşık aynı olduğu rapor edilmiştir. Ancak, hava kurusu haldeki hafif agregalarla üretilen hava sürüklenmiş hafif betonların donma-çözülme dayanıklılığının aynı koşullarda normal agregalarla üretilen normal betonlara kıyasla çok daha iyi olduğu belirtilmiştir (Clarke, 1993).

### **2.9.3 Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı**

Yapısal hafif agregalı betonlar; içeriğindeki hafif agregaların yüksek sıcaklıklara karşı daha kararlı ve dayanıklı olmasından, ısı iletkenliklerinin daha iyi olmasından kaynaklı olarak daha iyi yalıtım özelliğine sahip olmasından, daha az termal genleşmeye ve termal genleşmenin neden olabileceği parçalanmalara daha az eğilimli olmasından dolayı yangına normal betondan daha dayanıklıdır (Newman, 2003). Hafif betonda kullanılan hafif agregaların ısı genleşmelerinin daha az olması ve yüksek sıcaklıklarda normal agregalara göre daha stabil olması hafif betonu normal betona göre yüksek sıcaklıklara karşı daha dayanıklı kılar (Clarke, 1993; Neville, 2000).

### **2.9.4 Aşınma direnci**

Normal betonla aynı  $f_c$  değerlerine sahip hafif betonun aşınma dayanıklılığı genellikle daha düşüktür. Bu yüzden çok fazla aşınmaya maruz yapı ve yapı elemanlarının üretiminde hafif beton önerilmemektedir. Yapay hafif agregaya içeren hafif betonların aşınma dayanıklılığı doğal agregalarla üretilen hafif betonlara göre daha iyi olmakla birlikte yapay hafif agregalarla üretilen hafif betonların normal derecede aşınmaya maruz yapı ve yapı elemanlarında kullanılabileceği rapor edilmiştir (Baradan vd., 2012). Normal betonda olduğu gibi hafif betonda da  $f_c$  değerlerinin artışı ile birlikte aşınma direnci de artmaktadır. Ancak, hafif beton agregaya parçacıkları ortaya çıkacak derecede aşındırılır ise, normal betona göre daha hızlı bozulur. Hafif betonun aşınma direnci nispeten daha yumuşak olan hafif agregaya ile birlikte sert ince agregaya içeriği, daha yüksek kalitede çimento matrisi ve yüzey güçlendirici uygulamalar ile artırılabilir (Clarke, 1993).

### 2.9.5 Donatı korozyonuna etkileri

Hafif agregalı betondaki yüksek çimento içeriği, korozyonu engelleyen yüksek derecede alkali bir ortam oluşmasını sağlar. Bununla birlikte, yüksek çimento dozajı hafif betonu iyi sıkıştırma ihtimalini artırdığı için korozyon riski azaltılmış olur (Newman, 2003). İkinci Dünya Savaşı sırasında hafif beton ile yapılan betonarme gemilerden alınan karot numuneler incelendiğinde; uzun süre deniz suyu etkisinde bulunan hafif betonlarda korozyona rastlanmamış ve karbonatlaşma derinliklerinin de sadece 1 mm ile 2 mm arasında olduğu gözlenmiştir (Chandra ve Berntsson, 2002).

### 2.10 Hafif Beton Konusunda Yapılmış Olan Çalışmalar

Terzić vd. (2015), peletlenmiş UK agregaları ile hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri hafif betonun  $f_c$ ,  $f_{fs}$ , boşluk yapısı, rötre ve elastisite modülü özelliklerini normal ağırlıklı agregalar ile ürettikleri betonla kıyaslamışlardır. UK malzemesinin inceliğinin artması ile birlikte betonun dayanımının da arttığını belirtmişlerdir. Soğuk bağlı ve sinterlenmiş UK agregaları ile ürettikleri betonlarda 28.87 MPa ile 52.64 MPa arasında  $f_c$ , 2.62 MPa ile 4.45 MPa arasında  $f_{fs}$ , 31.33 GPa ile 36.74 GPa arasında elastisite modülü ve %17.55 ile %26.25 arasında boşluk oranı değerleri elde etmişlerdir. Ayrıca, hafif agregalarla ürettikleri betonlarda daha yüksek rötre değerleri elde etmişler, bunun nedeni olarak da hafif agregalı betonların daha boşluklu bir yapıya sahip olmasını ve suyun hafif agregalı betondan daha kolay serbest kalmasını göstermişlerdir. Soğuk bağlı UK agregalarının daha boşluklu olmasından dolayı bu agregalarla ürettikleri betonlar normal ağırlıklı betonlara ve sinterlenmiş UK agregaları ile ürettikleri hafif betonlara göre daha düşük performans göstermiştir. Ayrıca, sinterlenmiş UK agregaları ile normal ağırlıklı yapısal betonla benzer performansa sahip hafif betonlar elde etmişlerdir. Sonuç olarak, atıkların geri dönüşümü yoluyla agrega üretiminin hem doğal agregaya iyi bir alternatif olduğu, hem de atık yönetimi ile ilgili sürdürülebilir ekolojik bir çözüm sağlanabileceği rapor edilmiştir.

Kucharczyková vd. (2010), donma-çözülme döngülerinin hafif betonların kırılma parametreleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Hafif beton numuneleri  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de dondurulmuş ve  $+20^{\circ}\text{C}$ 'de çözdürülmüştür. Nem oranı sırasıyla %0, %13 ve %29 olan agregalarla üç farklı seride hafif betonlar üretmişlerdir. Tüm numuneler 200 kez donma

çözülme işlemine tabi tutulmuş, bu işlemden sonra numunelerin yüzeylerinde açık bir çatlak görülmemiştir. Kuru agregalarla üretilen dondurulmuş numunelerin  $f_c$ , elastisite modülü, efektif kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerleri ile yine kuru agregalarla üretilen dondurma işlemine tabi tutulmayan numunelerden elde edilen değerler arasında önemli bir fark bulunmadığı belirtilmiştir. Ancak donma-çözülme döngüsünün kuru numunelerin  $f_{sts}$  değerlerini düşürdüğü rapor edilmiştir. %13 neme sahip agregalarla üretilen donma çözülme işlemine tabi tutulmuş numunelerin  $f_{sts}$  değerleri, efektif kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerleri ile %13 neme sahip agregalarla üretilen donma çözülme işlemine tabi tutulmamış numunelerden elde edilen değerler arasında önemli bir fark bulunmadığı belirtilmiştir. Ancak donma-çözülme döngüsünün %13 neme sahip agregalarla üretilen hafif betonların  $f_c$  ve elastisite modülü değerlerini düşürdüğü rapor edilmiştir. %29 neme sahip agregalarla üretilen numunelerin  $f_{sts}$  ve elastisite modülü değerleri ile aynı neme sahip agregalarla üretilen donma-çözülme işlemine tabi tutulmayan numunelerden elde edilen değerler arasında önemli bir fark bulunmadığı belirtilmiştir. Donma-çözülme döngüsünün %29 neme sahip agregalarla üretilen hafif betonların  $f_{sts}$  değerlerini düşürdüğü fakat kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerlerini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, yapısal hafif agregalı betonun karbonasyona bağlı korozyon direnci araştırılmıştır. Bu çalışmada, “Leca” ve “Argex” adında iki farklı geliştirilmiş kil agregası, sinterlenmiş UK agregası ve geliştirilmiş arduvaz agregası olmak üzere 4 farklı tipte agrega kullanılmıştır. Hafif agregalı betonları kıyaslamak için üretilen normal ağırlıklı betonda ise iki farklı tane boyunda kireç taşı agregası kullanılmıştır. Üretilen tüm betonlarda ince agrega olarak normal ağırlıklı kum kullanılmıştır. Hızlandırılmış karbonasyon deneyleri 105x50mm ebatlarında silindirik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dökümden 24 saat sonra kalıbından çıkarılan numuneler 6 gün suda kür edilmiş ve daha sonra  $50 \pm 5$  rölatif nem ve  $22 \pm 2$  °C sıcaklık ortamını sağlayacak bir kontrol hücresinde 28 gün bekletilmiştir. Sonuçlar, hafif agregalı betonlardaki su:çimento oranının artışı ile birlikte karbonatlaşmanın daha hızlı ve etkili olduğunu göstermiştir (Ferrer vd., 2016).

Kendiliğinden yerleşen hafif betonlar ile ilgili 2001 ile 2013 yılları arasında yapılmış olan 21 adet laboratuvar çalışmasının analiz edildiği bir çalışmada, kendiliğinden yerleşen hafif betonların karışım oranları ile ilgili bazı tespitler yapılmıştır. Analiz edilen

çalışmalarda hem düşük hem de yüksek  $f_c$  değerlerine sahip kendiliğinden yerleşen hafif betonların üretildiği görülmüştür. Analiz edilen kendiliğinden yerleşen hafif betonların %53'ü 32 MPa'dan %34'ü de 40 MPa'dan daha fazla  $f_c$  değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. İncelenen çalışmalarda hem hafif hem de normal ağırlıklı agregalar tercih edilirken, bu çalışmaların %70'inde normal ağırlıklı kaba agrega kullanılmamıştır. Hedeflenen akıcılığı, taze ve sertleşmiş diğer beton özelliklerini elde edebilmek için farklı tiplerde ve oranlarda mineral ve kimyasal katkılar (süper akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici ve viskozite artırıcı katkı vb.) kullanılmıştır. Ancak süper akışkanlaştırıcının kullanıldığı betonlarda hava sürükleyici ve viskozite artırıcı katkılar kullanılmamıştır. Laboratuvar ortamının, segregasyon ve tıkanma riski olmadan farklı akışkanlık,  $f_c$  ve yoğunluğa sahip kendiliğinden yerleşen hafif beton üretimine olanak sağladığı fakat gerçek yapım projelerinde çözülmesi gereken farklı problemlerle karşılaşılabilceği vurgulanmıştır (Vakhshouri ve Nejadi, 2016).

Nematollahi vd. (2017) yaptıkları çalışmada, F tipi UK esaslı jeopolimer kompozitlerin termal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Aktivatör olarak NaOH ve  $Na_2SiO_3$  kombinasyonundan oluşan bir solüsyon kullanmışlardır. Sürdürülebilir bir kompozit üretme amacıyla oldukları için yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak çimento yerine tamamen UK kullanmışlardır. Silis kumu ile ürettikleri numuneye ek olarak yoğunluğu ve ısı iletkenliği azaltmak için silis kumu yerine sırasıyla genişletilmiş perlit, mikroskobik boşluklu seramik küreler ve genişletilmiş cam agregası kullanarak numuneler üretmişlerdir. Agregada türünün jeopolimerin işlenebilirlik, yoğunluk,  $f_c$  ve çekme dayanımı özellikleri üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Normal ağırlıklı mikro silika kumu ile üretilen numuneler de dahil olmak üzere ürettikleri tüm jeopolimerlerin yoğunluklarının  $1833 \text{ kg/m}^3$ 'den az,  $f_c$  değerlerinin de 43.4 MPa'dan fazla olduğunu belirtmişler ve bu jeopolimerlerin yapısal hafif betonun yoğunluk ve dayanım gereksinimlerini karşıladığını rapor etmişlerdir. Normal ağırlıklı mikro silika kumu yerine hafif ağırlıklı agregada içeriğinin jeopolimerlerin  $f_c$  değerlerini ve çekme dayanımı değerlerini sırasıyla %24 ve %32 oranlarında azalttığını, ancak çekme sünekliğini çok fazla etkilemediğini belirtmişlerdir. Ayrıca mikro silika kumu yerine hafif ağırlıklı agregada kullanılan jeopolimerlerin termal iletkenliğinin, mikro silika kumu ile üretilen numunelerin termal iletkenliğinden oldukça (%38 ile %49 oranları arasında) düşük olduğunu belirtmişlerdir. Sonuç olarak, çimento ile üretilen geleneksel betondan

daha hafif daha çevreci ve daha düşük ısı iletkenliğine sahip jeopolimer kompozitler üretilebildiği rapor edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, yüksek  $f_{fs}$  değerlerine, eğilme etkisindeki sünekliğe ve mükemmel tokluğa sahip yüksek performanslı fiberle güçlendirilmiş hafif beton üretebilmek için karışım tasarımları yapılmış ve en uygun karışım bulunmaya çalışılmıştır. Fiber olarak düşük miktarlarda polimerik fiber kullanılmıştır. Hafif beton elde etmek için hafif agrega kullanmak ve hava sürükleyici katkı kullanmak üzere iki farklı üretim yöntemi tercih edilmiştir. Hafif agrega ile üretilen betonların yoğunluklarının hafif agrega içeriği ile birlikte azaldığı gözlenmiştir. Üretilen hafif betonların yoğunluğu normal betona göre %33 ile %70 arasında daha düşük elde edilmiştir. Hafif agrega içeriğinin artışı ile birlikte hafif betonun kırılma tokluğunun azaldığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada hava sürükleyici katkı ile üretilen betonlarda iki farklı hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Katkılardan biri ile istenilen düşük yoğunluk elde edilirken, diğeri ile bu amaca ulaşamamıştır. Böylece, farklı tiplerde hava sürükleyici katkıların yoğunluk azaltmada aynı verimlilikte olmadığı rapor edilmiştir. Ayrıca, gereğinden fazla (bu çalışmada %1) hava sürükleyici katkı içeriğinin yoğunluğu azaltmada etkili olmadığı ve beton dayanımını azalttığı gözlenmiştir. Hava sürükleyici katkı içeriği hafif betonun hem  $f_{fs}$  değerlerini hem de sünekliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Bunun nedeni olarak da fiber ile matris arasında bulunan sürtünme kuvvetinin azalması gösterilmiştir. Hafif agrega ile üretilen hafif betonlarda olduğu gibi hava sürükleyici katkı ile üretilen hafif betonlarda yoğunluğun azalması ile birlikte hafif betonun kırılma tokluğunun azaldığı belirtilmiştir. Aynı yoğunluğa sahip hafif agregalı beton ve hava sürükleyici katkı ile üretilen betonların kırılma tokluklarının da yaklaşık olarak aynı olduğu gözlenmiştir. Hafif agregalı betonlarda hafif agrega içeriği ile birlikte  $f_{fs}$  değerleri azalmıştır. Hafif agrega dayanımının agrega ile çimento matrisi ara yüzeyinden daha az olması nedeniyle hafif agrega içeriğinin artışı hafif beton dayanımını azaltmıştır. Fiber içeriği, hafif betonların eğilmede ilk kırılma dayanımını,  $f_{fs}$  değerlerini ve sünekliğini artırmıştır (Arısoy ve Wu, 2008).

Chen ve Liu (2008), yaptıkları çalışmada, çimento yerine ağırlıkça %10, %20, %30 ve %40 oranlarında kullandıkları UK, YFC ve %5, %10 ve %15 oranlarında kullandıkları silis dumanının yüksek dayanımlı hafif betonların işlenebilirlik ve  $f_c$  değerleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Karışımlardaki UK içeriğinin artışı ile birlikte kıvamda ve

işlenebilirlikte kademeli olarak bir artış gözlemişlerdir. Bunun nedeninin UK malzemesinin tanecik şekli olduğu ifade edilmiştir. Bununla birlikte, UK içeriğinin artışı ile birlikte betonda kuma oranının arttığını belirtmişlerdir. Betonun erken yaşlardaki dayanımı UK içeriği ile birlikte azalmıştır. Çimento yerine ağırlıkça %30 ve %40 oranlarında UK içeriği, hafif betonun dayanımını erken ve ileri yaşlarda olumsuz etkilerken; %10 ve %20 oranlarında UK içeriği erken yaş dayanımını olumsuz, ileri yaş dayanımını ise olumlu yönde etkilemiştir. Bunun nedeni olarak da UK malzemesinin puzolanik reaksiyon hızının düşük olması gösterilmiştir. Reolojik ve dayanım özellikleri göz önüne alındığında, UK malzemesinin hafif betonlarda çimento yerine mineral katkı olarak tek başına kullanımı önerilmemiştir. Hafif betondaki YFC içeriğinin artışı ile birlikte betonun kıvamında ve işlenebilirliğinde gelişme olduğunu gözlemişlerdir. UK ile üretilen hafif betonlar ile kıyaslandığında, YFC ile üretilen hafif betonların daha az işlenebilirliğe sahip olduğunu, bunun nedeninin de YFC tanelerinin kaba yüzey dokusu olduğunu belirtmişlerdir. Ancak YFC, beton karışımının viskozitesini artırmış ve agrega tanelerinin yüzeye çıkışını sınırlamıştır. YFC malzemesinin puzolanik reaksiyon hızının yüksek olması nedeniyle YFC ile üretilen hafif betonların erken yaşlardaki  $f_c$  değerleri UK ile üretilenlere göre daha yüksek elde edilmiştir. Araştırmacılar YFC ile ürettikleri hafif betonlardaki en yüksek dayanım ve işlenebilirliği %30 oranında YFC içeren betonlarda gözlemişlerdir. Reolojik ve dayanım özellikleri nedeniyle YFC malzemesinin hafif betonlarda mineral katkı olarak tek başına kullanımının uygun olduğu rapor edilmiştir. Silis dumanı içeriği ile birlikte karışımların işlenebilirliğinde hızlı bir azalma ve kıvam kaybında artış gözlemişlerdir. Ancak,  $f_c$  değeri silis dumanı içeriğinin artışı ile birlikte artmış, en yüksek  $f_c$  değerine %15 silis dumanı içeren betonlarda ulaşılmıştır. Silis dumanı içeren betonlarda süperakışkanlaştırıcılar olmadan işlenebilirlik ve kıvam kaybının önlenemediği belirtilmiş ve silis dumanının hafif betonlarda mineral katkı olarak tek başına kullanımının uygun olduğu belirtilmiştir. Ekonomik fayda, dayanım ve reolojik özellikleri göz önüne alındığında hafif betonlarda UK ve YFC malzemelerinin ikili kombinasyonu ve silis dumanı, UK ve YFC malzemelerinin üçlü kombinasyonu bu mineral katkıların herhangi birinin tek başına kullanımının yerine önerilmiştir.

Kılıç vd. (2003) yaptıkları deneysel çalışmada, mineral katkı içeren veya içermeyen yüksek dayanımlı yapısal hafif beton üretmişlerdir. Karışımlarında hafif agrega olarak BPA kullanmışlardır. Bağlayıcı madde olarak sadece çimento içeren kontrol hafif betonu ile birlikte; çimento yerine ağırlıkça %20 UK içeren, çimento yerine ağırlıkça %10 silis



dumanı içeren ve çimento yerine ağırlıkça hem %20 UK hem de %10 silis dumanı içeren hafif betonlar üretmişlerdir. Ayrıca, hafif betonla kıyaslamak amacıyla iki farklı normal ağırlıklı beton tasarlamışlardır. Numuneler, kırım gününe kadar %65 rölatif nem ve 20°C sıcaklık koşullarında kür edilmiştir. Yapılan deneyler BPA ile yapısal hafif beton üretilebileceğini göstermiştir. Ancak, mineral katkı kullanımının yüksek dayanımlı yapısal hafif beton üretimi için gerekli olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışma sonucunda bağlayıcı malzeme olarak çimento, UK ve silis dumanı ile ve agrega olarak da BPA ile üretilen yapısal hafif beton yüksek dayanımı (150x300 mm silindir numune için 40 MPa) ve çevresel faydaları nedeniyle tavsiye edilmiştir.

Diğer bir çalışmada, ince agrega yerine %15, %30, %45 ve %60 oranlarında kullanılan genişletilmiş perlit agregası ile iki farklı tipte (CEM II 32.5R ve CEM I 42.5R) ve üç farklı dozajda (300, 350 ve 400 kg/m<sup>3</sup>) çimento kullanılarak üretilen betonların özellikleri araştırılmıştır. Çimento dozajı ve kalitesinin artışı ile birlikte betonların  $f_c$ , dinamik elastisite modülü ve  $f_{sts}$  değerlerinde artış gözlenmiştir. Ancak çimento dozajı ve kalitesinin artışı ile kıvamda azalma, birim ağırlıkta ve vebe süresinde artma olduğu belirtilmiştir. Genleştirilmiş perlit agregası içeriğinin artışı ile birlikte  $f_c$  ve  $f_{sts}$  değerlerinde ve birim ağırlıkta azalma gözlenmiştir. Deneysel çalışmada sonuç olarak  $f_c$  ve  $f_{sts}$  değerlerinde azalmaya neden olmasına rağmen düşük oranlarda genişletilmiş perlit agregası kullanılarak hafif beton üretilebileceği rapor edilmiştir (Topçu ve Işıkdag, 2008).

## BÖLÜM III

### ALKALİ İLE AKTİVE ETME VE JEOPOLİMERİZASYON

#### 3.1. Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon Tanımları

Alkali ile aktive edilmiş malzeme, katı silikat tozu ile katı veya çözünmüş halde bulunan alkali metal kaynağının reaksiyonu sonucunda ortaya çıkan bağlayıcı sistemi ifade eden en geniş sınıflandırmanın adıdır (Buchwald vd., 2003; Shi vd., 2006). Bu katı silikat tozu geleneksel klinkerlere benzer olabileceği gibi alümina-silikat bakımından daha zengin olan metalürjik cüruf, doğal puzolan, UK veya taban külü gibi de olabilir. Alkali metal kaynağı ise alkali hidroksitler, silikatlar, karbonatlar, alüminatlar veya oksitler gibi alkali metal katyonları muhteva eden, reaksiyon karışımının pH oranını yükselten ve katı tozun çözülmesini hızlandıran herhangi bir çözücü maddedir (Wagh, 2004). Jeopolimerler çoğu durumda alkali ile aktive edilmiş malzemelerin bir alt kümesi olarak görülmekte, bu malzemelerde bağ fazı neredeyse tamamen alümina silikatlardan oluşmakta ve oldukça düzenli bir şekilde meydana gelmektedir (Duxson vd., 2005; Rahier vd., 1997). Böyle bir bağ fazına sahip bir jel elde edebilmek ve kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelinin zincir şeklindeki karakteristik yapısı yerine zeolitik ağ yapısına benzeyen bir yapı elde edebilmek için reaksiyona giren bileşenlerin mevcut kalsiyum içeriklerinin düşük olması gerekmektedir (Provis ve Deventer, 2014). Düşük kalsiyum içerikli UK ve kalsine killer jeopolimer sentezinde en çok kullanılan malzemelerdir (Duxson vd., 2007). Jeopolimer elde edebilmek için aktivatör genellikle bir alkali metal hidroksit veya silikat olmaktadır (Provis, 2009).

#### 3.2. Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon ile İlgili İlk Çalışmalar

Alkalilerin çimento ve benzeri bağlayıcı malzemelerin bir bileşeni olarak ilk kullanımı 1930 yılına dayanır. İlk olarak Kuhl 1930 yılında öğütülmüş cüruf tozu ile kostik potasyum solüsyonu karışımının priz alma sürelerini araştırmıştır. Ardından Chassevent, 1937 yılında kostik potasyum ve soda solüsyonu kullanarak cürufların reaktivitesini araştırdı. Purdon 1940'da cüruf ile birlikte kostik soda ve cüruf ile birlikte kostik alkaliler kullanarak klinkersiz çimento üretimi hakkındaki ilk kapsamlı laboratuvar çalışmasını gerçekleştirmiştir. 1957 yılında ise Glukhovsky alkali metal solüsyonları ile düşük

kalsiyumlu veya hiç kalsiyum içermeyen killer ile bağlayıcılar üretilebileceğini keşfetmiştir. Glukhovsky, bu bağlayıcıları toprak çimentolar ve bunlarla elde edilen betonları ise toprak silikatlar olarak ifade etmiştir. 1981 yılında Davidovits yanmış kaolinit, kalker ve diatomit karışımını alkali ile aktive ederek bağlayıcılar üretmiştir. Ürettiği bu bağlayıcıları jeopolimer olarak isimlendirmiştir. Ayrıca kendisi bu elde ettiği bağlayıcılar için 1994 yılında “Pyrament”, “Geopolycem” ve “Geopolymite” gibi marka isimleri almıştır. Krivenko, yaptığı deneysel çalışmada uygun alkali konsantrasyonu sağlandığında alkalilerin ve alkali metal tuzları ile birlikte silikatların, alüminatların ve alümina-silikatların sulu alkalın ortamda reaksiyon sergilediklerini gözlemiştir (Shi vd., 2006). Roy (1999), çalışmasında alkali ile aktive edilmiş mineral katkıların ve çimentoların ilk yıllardaki gelişim sürecini literatürde yapılan çalışmaları inceleyerek Çizelge 3.1’de özetlemiştir.

**Çizelge 3.1.** Alkali ile aktivasyon uygulamalarının tarihçesi (Roy, 1999)

Araştırmacı	Yıl	Çalışmanın Konusu
Feret	1939	Cürufun çimento üretiminde kullanımı
Purdon	1940	Alkali-cüruf kombinasyonları
Glukhovsky	1959	Alkalın çimentoların teorik esasları ve gelişimi
Glukhovsky	1965	Doğal kaynakların çimento bileşeni olarak kullanılması ile “alkalin çimentolar” teriminin ortaya çıkışı
Davidovits	1979	“Geopolimer” terimi ile polimerizasyon daha çok vurgulanmıştır
Malinowski	1979	Antik su kemerleri karakterize edilmiştir
Forss	1983	Cüruf, alkali ve süper akışkanlaştırıcı karışımından F-çimentosu üretimi
Langton ve Roy	1984	Antik yapı malzemeleri (Roma, Yunan ve Kıbrıs) karakterizasyonu
Davidovits ve Sawyer	1985	“Pyrament” patenti alınmıştır.
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$ ile ilgili tez
Malolepsy ve Petri	1986	Sentetik mellit cüruflarının aktivasyonu
Malek vd.	1986	Cüruf çimentoları ile düşük seviyede radyoaktif atık karışımları
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların karşılaştırılması
Deja ve Malolepsy	1989	Klorürlere direnci gösterilmiştir.
Kaushal vd.	1989	Adiyatik (tam yalıtımlı) kür edilmiş nükleer atığın zeolit formasyonu gibi alkalın karışımlardan oluşması
Roy ve Langton	1989	Antik beton ile benzerlikleri
Majumdar vd.	1989	$C_{12}A_7$ -cüruf aktivasyonu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali ile aktive edilmiş cüruf
Wu vd.	1990	Cüruf çimentosunun aktivasyonu
Roy vd.	1991	Hızlı priz alan alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar
Roy ve Silsbee	1992	Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar: genel bakış
Palomo ve Glasser	1992	Kimyasal bağlı seramikler ile birlikte metakaolin
Roy ve Malek	1993	Cüruf çimentosu
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecek betonlar
Krivenko	1994	Alkalın bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Cürufun ve alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikro yapısı

### **3.3. Alkali Aktivatörler ve Genel Özellikleri**

#### **3.3.1 Alkali hidroksitler**

Alkali aktivasyonda en yaygın kullanılan alkali hidroksitler sodyum ve potasyumdur. Sodyum ve potasyum hidroksitler klorürlü bileşiklerinin elektrolizi ile elde edilmektedir (Provis ve Deventer, 2014). Lityum, rubidyum ve sezyum hidroksitleri maliyetlerinin yüksek oluşu, kaynaklarının kıt olması ve sudaki çözünürlüklerinin düşük olması nedeniyle alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı üretiminde kullanımları sınırlıdır (Monnin ve Dubois, 2005). Sodyum ve potasyum hidroksitleri suda 25 °C’de 20 mol/kg’a kadar çözünebilmektedir (Kurt ve Bittner, 2006). F sınıfı UK malzemesini aktive etmek için yapılan çalışmalarda alkalilerin sudaki konsantrasyonu 5 mol/kg ve daha fazla olacak şekilde uygulanmıştır. Alkali hidroksitler özellikle metakaolin ve düşük kalsiyum içerikli UK gibi alümina-silikatların aktivasyonu için konsantrasyonu en az 5 molar olmalıdır (Provis ve Deventer, 2014). Hidroksitler ile aktive edilen UK genellikle reaktivitelerine göre 60 °C veya daha yüksek olmak üzere sıcak kür gerektirmektedir. Bu durum saha uygulamaları için zorluk getirmekte ve elde edilen bağlayıcıların kullanımı daha çok prefabrik sektörü için uygun olmaktadır. Hidroksit ile aktive edilen UK veya YFC içeren bağlayıcıların geçirgenliği ve çiçeklenmesi silikat ile aktive edilenlere göre genellikle daha fazla olmaktadır (Shi, 1996). Kür yönteminin gözden geçirilmesi ve gerekli diğer önlemlerin alınması ile bu durumun önüne geçilebilmektedir (Najafi vd., 2012). Bu dezavantajlarının yanında alkali hidroksitler ile aktive edilen UK esaslı jeopolimerler yaklaşık 1000 °C gibi yüksek sıcaklıklara karşı boyutsal kararlılığını koruyabilmektedir. Bu yüksek kararlılık jeopolimerin yapısında bulunan silikat jellerinin sıkı bağ yapısından kaynaklanmaktadır (Provis vd., 2009a). Alkali hidroksitler ile aktive edilen bağlayıcılar silikat ile aktive edilenlere göre daha işlenebilirler. Çünkü alkali hidroksitlerin viskozitesi silikatlarına göre daha düşük olmaktadır (Provis ve Bernal, 2014).

#### **3.3.2 Alkali silikatlar**

Sodyum ve potasyum silikatları alkali aktivasyonda endüstriyel açıdan en önemli aktivatörlerdir (Provis, 2009). Lityum silikatın çözünürlüğünün iyi olmaması, rubidyum ve sezyum silikatların ise pahalı ve kaynaklarının kıt olması nedeniyle aktivatör olarak kullanımı son derece sınırlıdır. Alkali silikatlar genellikle karbonat tuzlarından ve silisin

kalsinasyonu ile elde edilirler. Alkali silikatların suda çözülmesi sırasında CO<sub>2</sub> açığa çıkar ancak açığa çıkan CO<sub>2</sub> miktarı aynı miktardaki Portland çimentosu üretiminin neden olduğu CO<sub>2</sub> salınımına göre çok düşüktür (Gartner, 2004). Alkali silikatlar genellikle karbonatlı tuzlardan üretilmekte ve üretim esnasında eriyik halde olan silika camsı bir yapı kazanmaktadır. Bu camsı yapı bir sıvıda çözündüğünde viskoz ve yapışkan bir solüsyon elde edilir. Bu solüsyona cam suyu da denilmektedir (Provis ve Bernal, 2014).

### **3.3.3 Alkali karbonatlar**

Alkali karbonatlar Solvay yöntemi ile veya karbonat tuzları madenlerinden elde edilebilmektedir (Kostick, 2011a). Alkali karbonatların elde edilişleri silikat ve hidroksitlere göre daha çevreci yollarla olmasına rağmen karbonat çözeltilerinin alkalilik derecelerinin diğer aktive edici solüsyonlara göre daha düşük olması nedeniyle alkali aktivasyonda kullanımı sınırlıdır (Provis ve Deventer, 2014).

### **3.3.4 Alkali sülfatlar**

Alümina-silikatlı malzemeleri sodyum sülfat ile aktive etmek mümkündür. Eğer yeterli bağlayıcı malzeme özellikleri elde edilebiliyorsa, doğrudan madencilik ile veya diğer endüstri kimyasallarının üretiminin bir yan ürünü olarak elde edilen sodyum sülfatın bu amaç için kullanımı ekolojik açıdan oldukça faydalıdır (Kostick, 2011b).

## **3.4. Alkali İle Aktive Edilmiş Betonların ve Jeopolimerlerin Özellikleri**

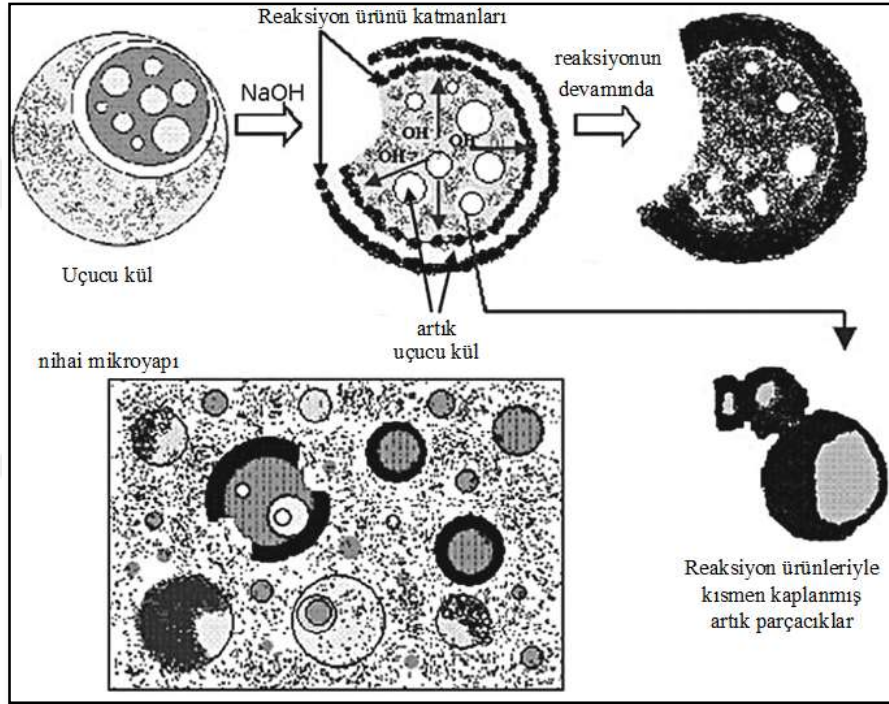
### **3.4.1 Mikro yapısal ve kimyasal özellikler**

YFC malzemesi gibi yüksek Ca içerikli malzemelerin aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı jellerin yapısı, mekanik özellikleri ve dayanıklılık performansı reaksiyon mekanizmasını kontrol eden çeşitli kimyasal faktörlere bağlıdır. Bu faktörler genel olarak iki kategoriye ayrılabilir: doğrudan kullanılan aktivatörle ilgili olanlar ve bağlayıcı malzemelerin karakteristik özellikleriyle ilgili olanlardır (Provis ve Deventer, 2014). Yüksek Ca içerikli malzemelerin alkali ile aktivasyonu esas olarak dört farklı mekanizma tarafından yönetilen oldukça heterojen bir reaksiyondur. Bu mekanizmalar; camsı öncü parçacıkların çözülmesi, başlangıç katı fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi, meydana

gelen bu fazların sınırlarında oluşan etkileşimler ve mekanik bağlar ile dinamik kimyasal denge sonucu reaksiyon oluşması ve ilerleyen kür yaşı ile meydana gelen reaksiyon ürünlerinin oluşması yoluyla reaktif türlerin difüzyonu şeklindedir (Fernández-Jiménez ve Puertas, 1997; Fernández-Jiménez vd., 1998; Bernal vd., 2011a). Yüksek Ca içerikli malzemelerin alkali ile aktivasyonu üzerine yapılan çalışmalarda varılan ortak görüş bu malzemeleri alkali ile aktive etme işlemi sonucunda oluşan ana reaksiyon ürününün Alüminyum ilaveli C-S-H jeli yani kalsiyum alümina silika hidrat (C-A-S-H) jeli olduğu ve bunun yanında da bozuk tobermorit yapısında ürünün oluştuğudur (Wang vd., 1995). İkincil reaksiyon ürünleri de daha çok NaOH ile aktive edilen bağlayıcılarda görülen AFm fazları, silikatla aktive edilen bağlayıcılarda görülen Si içerikli AFm fazları, yüksek MgO içerikli malzemelerin aktive edilmesi ile meydana gelen hidrotalsit ve yüksek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5 den düşük MgO içeren YFC gibi yoğun Ca muhteva eden malzemelerin aktivasyonu sonucu oluşan gismondin ve garronit gibi zeolitlerdir (Provis ve Deventer, 2014). Yüksek Ca içerikli malzemelerin alkali ile aktive edilmesi sonucu reaksiyon ürünü olarak oluşan C-A-S-H jelinin yapısı ve bileşimi kullanılan aktivatörün niteliklerine ciddi şekilde bağlıdır. YFC malzemesinin NaOH ile aktive edilmesi sonucu oluşan C-A-S-H tipi jeli, silikatlarla aktive edilmesi sonucu oluşan aynı tipteki jele göre daha yüksek Ca/Si oranına sahip ve daha düzenli bir yapıya sahiptir (Escalante-Garcia vd., 2003; Fernández-Jiménez vd., 2003). Yapılan bazı araştırmalarda NaOH ve silikatlarla aktive edilen YFC esaslı bağlayıcılarda meydana gelen C-A-S-H jelinin yapısındaki Ca<sup>+2</sup> iyonunun bir kısmının yerini Na<sup>+</sup> iyonunun alabileceği ve sodyum ilaveli kalsiyum alümina silikat hidrat (C-(N)-A-S-H) tipinde bir jelin oluşabileceği rapor edilmiştir (Haha vd., 2011). Yüksek kalsiyum içerikli malzemelerin alkali ile aktive edilmesiyle elde edilen bağlayıcılarda farklı kompozisyonlara sahip AFm, hidrotalsit ve zeolit tipi fazlar meydana geldiği bilinmektedir. Ancak bu bağlayıcıların kimyasal yapısında oldukça etken olan ikincil fazlar henüz yeterince iyi anlaşılamamıştır (Provis ve Deventer, 2014).

Jeopolimer terimi ilk olarak Davidovits'in 1970 yılında metakaolin başta olmak üzere kalsine killerin alkali ile aktivasyonu ile elde ettiği ürünleri ifade etmek için kullanılmıştır (Davidovits, 2008). Düşük kalsiyum içerikli veya hiç kalsiyum içermeyen bir alümina-silikat katı malzeme ile yüksek konsantreye sahip sıvı alkali hidroksitin veya silikatın reaksiyonu sonucu jeopolimer adında sentetik bir alümina-silikat malzeme elde edilir (Glukhovsky, 1994). F sınıfı UK ve metakaolin gibi düşük kalsiyum içerikli malzemelerin alkali ile aktive edilmesi ile elde edilen jeopolimerlerin bağ yapısı temel

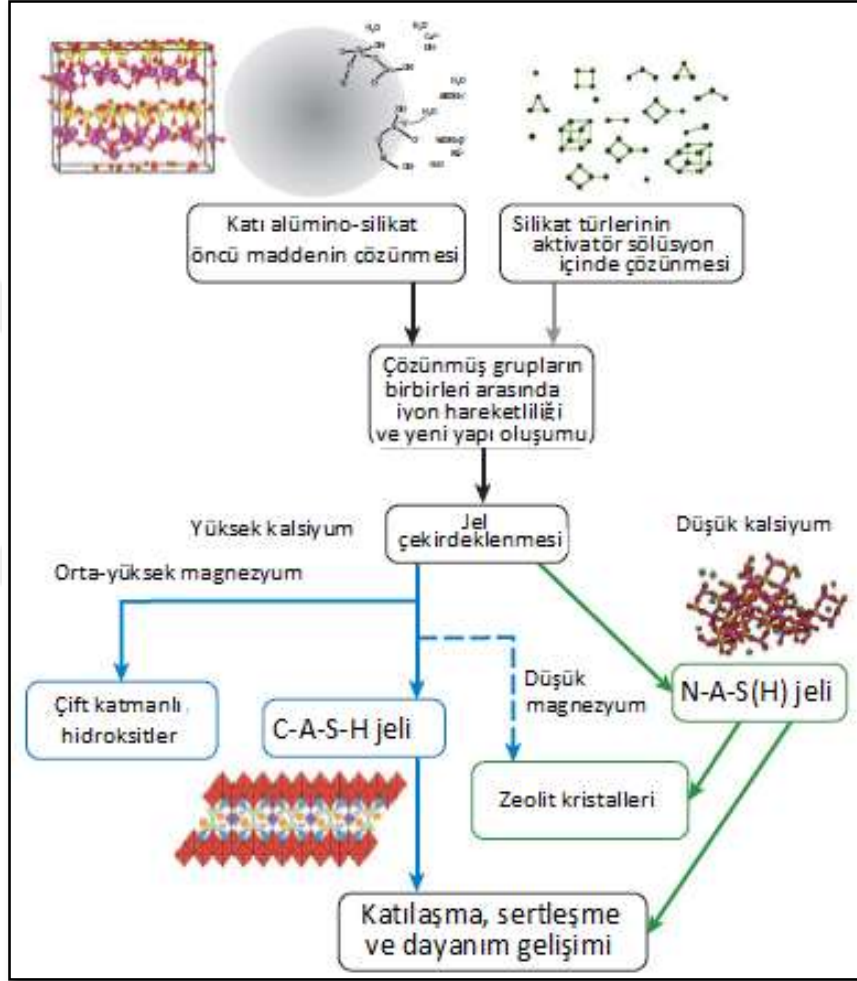
olarak oldukça düzensiz ve birbirine çapraz bağlı alümina-silikatlardan oluşmaktadır. Oluşan jelin yapısında Si ve Al, alkali katyonlarla birlikte dördü bir bağ iskeleti meydana getirirler. Bu jel yapısı ile zeolitlerin yapısı arasındaki benzerlikler birçok çalışmada ortaya konmuştur (Provis ve Deventer, 2014). Fernández-Jiménez vd. (2005) yaptıkları çalışmada UK malzemesinin alkali hidroksitlerle aktive edilmesi ile ilgili mikro yapısal bir model ortaya koymuşlardır. Şekil 3.1'de gösterilen bu modelde içi kısmen boşluklu UK taneciğinin camsı kabuğuna alkali hidroksit aktivatörün nüfuz etmesi ile parçacığın içinde ve dış kabuğunda reaksiyon ürünleri oluşması süreci aşama aşama ele alınmıştır.



**Şekil 3.1.** Uçucu külden alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı elde edilmesi (Fernández-Jiménez vd., 2005)

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların yapılarının temel taşı olan jellerin türüne göre basit şekilde sınıflandırılması Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu sınıflama temel olarak kullanılan bağlayıcı malzemedeki ve bu malzemenin bir alkali solüsyon ile reaksiyonu sonucunda meydana gelen jeldeki Ca içeriğine göre yapılmıştır. Burada, ana reaksiyon ürünü bir alkali alümina silikat jel ya da kalsiyum alümina silikat tipinde bir jel olabilmektedir. Bu jellerden ilki Şekil 3.2’de sağ tarafta bulunan sodyum alümina silikat hidrat (N-A-S-(H)) jelidir. Burada sodyumu ifade eden N yerine potasyum K olarak da ifade edilebilmektedir. Bu jelde suyu ifade eden H nin parantez içinde yazılmasının nedeni suyun bu jeldeki baskın yapısal bir bileşen olmayışındır. Şekil 3.2’de sol taraftaki yüksek kalsiyumlu

bağlayıcı malzemelerin alkalilerle aktivasyonu sonucunda C-A-S-H tipi jel ve ikincil reaksiyon ürünü olarak da çift katmanlı hidroksit grupları meydana gelmektedir (Allen vd., 2007). Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıları ifade ederken kalsiyum içeriğine göre yapılan sınıflamada, yüksek kalsiyum içerikli olanların  $Ca/(Si+Al)$  oranı yaklaşık 1 olarak düşünülmektedir. Bu bağlayıcılar genellikle YFC malzemesinin alkalilerle reaksiyonu sonucu elde edilmektedir (Taylor vd., 2010).



Şekil 3.2. Bir katı alümina silikat bağlayıcı malzemenin alkali aktivasyon süreci (Provis ve Bernal, 2014)

### 3.4.2 Dayanım ve dayanıklılık

Sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC ile birlikte YFC yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında kuvars tozu kullanılarak bağlayıcılar elde edilen bir çalışmada  $f_c$  değerinin kuvars tozu içeriği ile birlikte arttığı rapor edilmiş, en yüksek  $f_c$  değerlerine %30 kuvars kumu kullanılan pastalarda ulaşılmıştır (Rashad vd., 2012).



Escalante-García vd. (2002), cürüflü harç karışımlarında %6 Na<sub>2</sub>O içerecek kadar NaOH kullanmışlardır. Harç karışımlarını kontrol karışımı yanında cüruf yerine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranlarında silis dumanı kullanmışlardır. Bu çalışmada,  $f_c$  değerleri silis dumanı içeriği ile birlikte %15 silis dumanı içeriğine kadar artmış ancak %20 seviyesinde  $f_c$  değerlerinde azalma gözlenmiştir. Yapılan bir çalışmada bağlayıcı malzeme olarak sadece YFC içeren ve YFC ile birlikte YFC yerine ağırlıkça %50 UK içeren karışımlar sodyum silikat veya NaOH ile aktive edilmiştir. Aktivatör olarak NaOH kullanılan karışımlarda UK içeriğinin  $f_c$  değerleri üzerinde önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Ancak, sodyum silikat ile aktive edilen karışımlarda ise UK varlığının  $f_c$  değerleri üzerinde olumsuz etki yaptığı belirtilmiştir (Shi ve Day, 1999). Weiguo vd. (2011) yaptıkları deneysel çalışmada, YFC ile birlikte YFC yerine ağırlıkça %30, %40, %60, %70 ve %100 oranlarında UK malzemesini Ms modülü (aktivatörlerin SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O oranı) 1 olacak şekilde sodyum silikat ve NaOH kullanarak aktive etmişlerdir. Deneysel sonuçlar,  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerinin UK içeriği ile birlikte azaldığını göstermiştir. Sırasıyla en yüksek 28 günlük  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerleri olan 49.6 MPa ve 8.4 MPa değerlerine UK içermeyen numunelerde ulaşmışlardır. Aydın (2013), NaOH ve sodyum silikat ile aktive ettiği YFC içeren harçlarda kontrol karışımı yanında YFC yerine ağırlıkça %20 ve %40 oranlarında UK, %10 ve %20 oranlarında silis dumanı ile ikili karışımlar ve silis dumanı, UK ve YFC malzemelerinin yer aldığı üçlü karışımlar üretmiştir. Alkali ile aktive ettiği bu karışımların yanında geleneksel Portland çimentosuyla da numuneler üretmiştir. Harç numunelerini önce 5 saat boyunca 20 °C de %90 rölatif nem koşullarında daha sonra da 70 °C de 6 saat boyunca kür etmiştir. Deneysel sonuçlar, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların Portland çimentolu harçlara göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu ancak kuruma rötresinin, kılcal geçirimliliğin ve geçirgen boşluk hacminin daha fazla olduğunu göstermiştir. Bu sakıncalar silis dumanı ve UK malzemesinin YFC ile birlikte ikili karışım olarak ayrı ayrı kullanılmasıyla ortadan kalkmıştır. Tüm ikili ve üçlü karışımların mekanik özellikleri Portland çimentolu harçlara göre daha iyi elde edilmiş ve en yüksek  $f_c$  değerlerine %10 silis dumanı içeren numunelerde ulaşılmıştır (73.7 MPa). En yüksek  $f_{fs}$  değerine ise sadece YFC içeren numunelerde ulaşılmıştır. Ağırlıkça 100/0, 65/35, 50/50, 35/65 ve 0/100 YFC/UK oranları ile jeopolimer bağlayıcı pastalarının üretildiği bir çalışmada, aktivatör olarak sodyum silikat ve NaOH kullanılmıştır. Ms modülünün 0, 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 olarak belirlendiği bu çalışmada, aktivatör konsantrasyonunun %4 ve %8 olduğu belirtilmiştir. Döküm sonrasında numuneler öncelikle 23 °C ve %50 rölatif nem koşullarında 2 saat bekletildikten sonra 80 °C de %95

rölatif nem koşullarında 22 saat kür edilmiştir. Dökümden 24 saat sonra ise numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve bu işlemten hemen sonra  $f_c$  değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada, en yüksek  $f_c$  değerleri %8 Na içeren, Ms modülünün 1.0 ile 1.5 olduğu, YFC/UK oranı 35/65 olan pastalarda elde edilmiştir.

Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin karbonatlaşma mekanizması özellikle ham malzemenin türüne (UK, YFC metakaolin vb.), kullanılan aktivatörün içeriğine ve konsantrasyonuna bağlıdır (Bernal vd., 2013; Palacios ve Puertas, 2006). Alkali ile aktive edilecek YFC malzemesinde bulunan MgO içeriği, karbonatlaşma hızı ve mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu etkinin nedeni yüksek MgO içerikli YFC malzemelerinin alkali ile reaksiyonu sonucunda ikincil bir yan ürün olarak hidrotalsit türü yapıya sahip çift katmalı hidroksitlerin meydana gelmesidir. Bu çift katmanlı hidroksitlerin ortamda bulunan CO<sub>2</sub>'i absorbe etme kapasitesi vardır. Silikatlarla aktive edilmiş bağlayıcılarda ise zengin Al içerikli bu ikincil fazların oluşumu C–A–S–H tipi jele bağlanan Al miktarını da azaltmaktadır. Bu etkiler alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların karbonatlaşma direncini artırmaktadır (Bernal vd., 2014a). Ancak, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların hızlandırılmış karbonatlaşma deneyine tabi tutulduğu bazı çalışmalarda alkali ile aktive edilmiş YFC malzemesinin karbonatlaşmaya yatkınlığının Portland çimentolu bağlayıcılara göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak da Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda meydana gelen portlanditin bir reaksiyon ürünü olarak alkali ile aktive edilen YFC esaslı bağlayıcılarda meydana gelmemesi, bu bağlayıcı jeldeki düşük Ca/Si oranı ve gözeneklerdeki çözeltilerde yüksek alkali içeriği gösterilmiştir. Tüm bu faktörler C–A–S–H tipi jellerin dekalsifikasyona neden olmakta bu durum da CaCO<sub>3</sub> oluşumunu ve dolayısıyla karbonatlaşma riskini artırmaktadır. Bununla birlikte, bağlayıcıların normal ortamlarında bu kadar fazla karbonatlaşma yoğunluğuna maruz kalmayacağı da göz önünde bulundurulmalıdır. Silikatlarla aktive edilmiş YFC esaslı betonların normal karbonatlaşma ortamına 7 yıl boyunca maruz bırakıldığı bir çalışma neticesinde bu betonların karbonatlaşma derinliklerinin 1.7 mm olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada, normal dayanımlı Portland çimentosu ile üretilen betonlar yine doğal ortamda karbonatlaşmaya tabi tutulmuş ve 1 yıllık karbonatlaşma derinliklerinin 2 ila 10 mm arasında olduğu rapor edilmiştir (Bernal and Provis, 2014). Yapılan bir çalışma, alkali ile aktive edilmiş UK içeren betonlarda düşük kalsiyum içerikli UK kullanılması ile yüksek kalsiyumlu olanlara nazaran daha az boşluklu bağlayıcı elde edilmesinden dolayı

karbonatlaşma direncinin arttığı rapor edilmiştir (Badar vd., 2014). Metakaolin içeriği alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların karbonatlaşma sonrası su geçirgenliğini ve toplam boşluk miktarını azaltmaktadır (Bernal vd., 2014b; Bernal, 2015). Ayrıca, metakaolin içeriği bu bağlayıcıların erken yaşlardaki dayanım gelişimini hızlandırdığından karbonatlaşmaya karşı olan hassasiyetlerini de azaltmaktadır (Zhang vd., 2017). Deja (2002), sodyum silikat ile aktive edilen YFC esaslı bağlayıcıların karbonatlaşma oranlarının  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ile aktive edilenlere göre daha az olduğunu bildirmiştir. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların  $\text{CO}_2$ 'ce zengin ortama maruz bırakıldığı bir çalışmada, aktivatör olarak cam suyu kullanılan harçlarda C-S-H jelinin dekalsifikasyonu ile matris kohezyon kaybına uğramış, porozite artmış ve dayanım azalmıştır (Puertas vd., 2005). Ancak, aynı ortamda aktivatör olarak NaOH kullanıldığında ise matris kohezyonu artmış, ortalama boşluk boyutu azalmış ve karbonatlaşma sonrası dayanımda artış gözlenmiştir (Palacios ve Puertas, 2006). Normal karbonatlaşma koşullarına maruz 8 yıllık jeopolimer betonların karbonatlaşma direncine aktivatör türünün etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, NaOH, KOH ve sodyum silikatın birlikte kullanıldığı karışımların karbonatlaşma direnci geleneksel betona göre daha düşük iken, NaOH ve KOH ile aktive edilen bu betonların karbonatlaşma direnci geleneksel betona benzer olmuştur (Pasupathy vd., 2016).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların sülfat dayanıklılığı hakkında henüz tutarlı sonuçlar elde edilememiştir. Yapılan bazı çalışmalarda  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solüsyonuna maruz bırakılan alkali ile aktive edilmiş YFC içeren harçlarda ve UK esaslı veya taban küllü jeopolimer harçlarda herhangi bir genleşme veya çatlama görülmezken, aynı etkiye maruz bırakılan Portland çimentolu harçlarda ise ikincil reaksiyon ürünleri olan etrenjit veya alçıtaşından kaynaklı çatlaklar gözlenmiştir (Bakharev vd., 2002; Ismail vd., 2013a). Bu çalışmaların aksine UK içeren jeopolimer bağlayıcıların  $\text{MgSO}_4$  solüsyonuna maruz bırakıldığı bazı çalışmalarda ise belirgin bir  $f_c$  kaybı, düşük kalsiyum içerikli UK ile üretilen bağlayıcılarda alçıtaşı ve etrenjit oluşumu ve yüksek kalsiyumlu UK ile üretilen bağlayıcılarda da alçıtaşı, brusit ve magnezyum silikat hidrat fazları gözlenmiştir (Thokchom vd., 2010; Bakharev, 2005; Chindaprasirt vd., 2013). Sodyum silikat ile aktive edilen YFC esaslı betonların uzunlukları, kütleleri, dinamik elastisite modülleri ve  $U_{pv}$  değerleri  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltilisine 120 gün boyunca maruz bırakıldıktan sonra çok az değişiklik göstermiştir. Ancak bu sonuçların daha uzun süre sülfat etkisinde değişebileceği vurgulanmıştır (Douglas vd., 1992). Deneysel bir çalışmada, alkali ile

aktive edilen YFC esaslı betonlar 90 gün boyunca %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakılmış ve bu işlem betonların  $f_c$  değerlerinde önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. Ancak, aynı koşullarda bekletilen Portland çimentolu geleneksel betonlardaki alçıtaşı ve etrenjit oluşumundan dolayı %40'dan fazla dayanım kaybı ve alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonlara göre 6 kat daha fazla genişleme gözlenmiştir (Rodríguez vd., 2008).

Heikal vd. (2014), yaptıkları çalışmada, sodyum silikat ile aktive ettikleri YFC esaslı harçları 180 gün boyunca MgSO<sub>4</sub> solüsyonuna daldırmışlardır. Yaptıkları sülfata dayanıklılık testleri alkali ile aktive edilen YFC esaslı harçların Portland çimentolu geleneksel harçlara göre daha dayanıklı olduğunu göstermiş ve kür yaşı arttıkça meydana gelen hidratasyon ürünleri ile birlikte SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> iyonlarının difüzyonu azalmıştır. Yapılan diğer bir çalışmada, alkali ile YFC veya YFC ve UK karışımı aktive edilmiş ve bu bağlayıcılar Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine daldırılmıştır. Sonuçlar bu bağlayıcıların Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine yüksek derecede dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, sülfat dayanıklılığının daha çok kullanılan aktivatörlerin yapısına ve bu aktivatörler ve mineral katkıların reaksiyonu sonucu meydana gelen jellere bağlı olduğunu düşünmüşlerdir. Bu düşüncenin nedeni de yaptıkları bu çalışmada NaOH ile aktive ettikleri YFC esaslı harçların sodyum silikat ile aktive edilenlere göre yüksek yapısal düzene, düşük polarizasyona ve yüksek Ca/Si oranına sahip olmasıdır (Puertas vd., 2002). Aktivatör dozajının artması sodyum silikat ile aktive edilen YFC ve UK karışımların porozitesini azaltmakta,  $f_c$  değerlerini artırmakta ve sülfat saldırısına karşı dayanıklılığı da artırmaktadır (Wang vd., 2015). Bakharev vd. (2002), 12 ay boyunca Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bıraktıkları sodyum silikat ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların %17, aynı koşullara maruz geleneksel harçların ise %25  $f_c$  kaybına uğradığını bildirmişlerdir. Aynı koşullarda üretilen bu harçlar Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisi yerine %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz bırakıldığında ise alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçlar %23, geleneksel harçlar ise %37 dayanım kaybına uğramıştır. MgSO<sub>4</sub> çözeltisine maruz alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçlarda C-S-H jellerinde meydana gelen bozulma ve bozulma sonucu meydana gelen alçıtaşı bu harçlarda MgSO<sub>4</sub> çözeltisinin neden olduğu bozulmanın temel nedenidir. Genel itibariyle yüksek Ca içerikli alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine karşı MgSO<sub>4</sub> çözeltisine olduğundan daha fazla dayanıklıdır (Zhang vd., 2017). Bu durumu yapılan diğer bazı deneysel çalışmalar da desteklemektedir. Mithun ve Narasimhan (2016), 12 ay boyunca %10 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisine daldırdıkları alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların  $f_c$  değerlerinde artış gözlerken, geleneksel betona göre

daha iyi dayanıklılığa sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, %10 MgSO<sub>4</sub> çözeltisine daldırdıklarında ise bu durum değişmiş, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların dayanım kaybı geleneksel betona göre daha fazla olmuştur. Valencia Saavedra vd. (2016), ağırlıkça %80 UK ve %20 YFC içeren alkali ile aktive edilmiş betonları %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve %5 MgSO<sub>4</sub> çözeltilerinde ayrı ayrı bekletmişlerdir. Araştırmacılar en fazla deformasyonun MgSO<sub>4</sub> çözeltisinde bekletilen betonlarda olduğunu bildirmişlerdir. Düşük Ca içerikli jeopolimer sistemler genellikle çok iyi sülfat dayanıklılığına sahiptir. Yapılan bir çalışmada, %4.4 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonunda 1 yıl bekletilen alkali ile aktive edilmiş UK esaslı jeopolimer harçlarda herhangi bir bozulma gözlenmemiştir (Fernandez-Jimenez vd., 2006). Ayrıca, %5 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solüsyonunda bekletilen UK ve kaolin kil esaslı jeopolimerlerin çok iyi sülfat dayanıklılığına sahip olduğu belirtilmiştir (Hardjito vd., 2004, Slaty vd., 2015). Yüksek Ca içerikli alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların aksine düşük Ca içerenlerin MgSO<sub>4</sub> dayanıklılıkları genellikle Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dayanıklılıklarından daha iyidir (Zhang vd., 2017).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların klor geçirgenliği, bu bağlayıcılarda meydana gelen jellerin boşluk doldurma ve klor iyonlarını bağlama kapasitesine bağlıdır (Bernal and Provis, 2014). Boşluk doldurma açısından bakılacak olursa, C–A–S–H tipi jeller N–A–S–(H) tipi jeopolimer jellere göre daha az boşlukludur (Provis vd., 2012). Ca içeriği fazla olan alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda meydana gelen C–A–S–H jellerinin içyapılarında ve katmanları arası boşluklarda klor iyonları kimyasal olarak absorbe edilemez. Bunun yanında bu bağlayıcılarda oluşan C–S–H jellerinde klor iyonları bağlanabilmektedir (Yuan vd., 2009). Portland çimentosu ve YFC esaslı alkali bağlayıcılarda meydana gelen ikincil reaksiyon ürünü olan çift katmanlı hidroksitlerin yüksek klor absorbe etme özelliklerinden dolayı bu bağlayıcıların klor geçirgenliği üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir (Kayali vd., 2012). Alkali ile aktive edilmiş düşük Ca içerikli bağlayıcılarda ise klor iyonu bağlanma oranı kalsiyumca zengin bağlayıcılara göre daha fazladır (Ismail vd., 2013c). Bu bağlayıcılarda klor iyonu bağlama miktarının fazla oluşunun başlıca nedeni N–A–S–(H) jellerinin yüzey alanının kalsiyumca fakir bağlayıcılarda meydana gelen C–A–S–H jelinden daha fazla olmasıdır (Ismail vd., 2013b). Yapılan birçok çalışma alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların klorür direncinin aynı dayanıma sahip geleneksel betona benzer olduğunu göstermiştir (Zhang vd., 2017). Yapılan bir çalışmada %3.5 NaCl solüsyonuna maruz bırakılan geleneksel beton ile alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonların bünyelerindeki çeliğin korozyon

davranışlarının benzer olduğu bildirilmiştir (Chaparro vd., 2012). Ayrıca UK ve YFC malzemelerinin ikili karışımı ile üretilen jeopolimer betonların içlerine yerleştirilen donatıların klorla doyurulmuş ortamda geleneksel betonla benzer polarizasyona sahip olduğu rapor edilmiştir (Babae ve Castel, 2016). F sınıfı UK ile üretilen jeopolimer bağlayıcılarla C sınıfı UK ile üretilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların klor direnci üzerine yapılan bir çalışmada, F sınıfı UK ile üretilen jeopolimerlerin klor dirençlerinin daha iyi olduğu, bunun nedeni olarak da reaksiyon ürünlerinin farklılığı ve F sınıfı UK ile üretilen jeopolimerde daha yoğun matris oluşumu bildirilmiştir (Allouche, 2013). Shaikh (2014), F sınıfı UK ile üretilen jeopolimer betonların klor iyonu penetrasyon derinliklerinin geleneksel betondan daha az olduğunu gözlemiş ve  $f_c$  ile aktivatör dozajının artmasıyla birlikte bu derinliğin de azaldığını rapor etmiştir. Ayrıca, UK ile YFC karışımlarının alkali ile aktivasyonundan elde edilen bağlayıcıların bünyelerinde meydana gelen jellerin kimyasal kompozisyonunun, bu bağlayıcılar klorid ortamına maruz bırakıldıklarında bağlayıcılarda meydana gelen klor iyonu hareketliliği üzerinde önemli etkisi olduğu bildirilmiştir. Bu bağlamda, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda meydana gelen C-A-S-H jelinin klorid direncinin UK ile üretilen jeopolimerlerde meydana gelen N-A-S-(H) jellerine göre daha iyi olduğu rapor edilmiştir (Ismail vd., 2013c). Della vd. (2000), NaOH ile aktive ettikleri YFC ve UK karışımlarındaki YFC içeriğinin artışı ile birlikte klor difüzyonunun azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş doğal puzolanlı betonların su:bağlayıcı oranının artması ile birlikte klor difüzyonunun arttığı belirtilmiştir (Dali vd., 2012).

Hidrate çimento hamuru bazik bir malzemedir ve asit içerikli maddelerin saldırısına uğrayabilmektedir. Bu saldırı sonucunda da yapısındaki kalsiyumu yitiren çimento pastası zarar görmekte ve istenilen performansı gösterememektedir. Yapılan birçok çalışma, hidratasyonları sonucu oluşan ürünlerin yapılarından kaynaklı olarak alkali ile aktive edilmiş malzemelerin asit korozyon dirençlerinin Portland çimento pastalarına göre daha iyi olduğunu göstermiştir. Asit saldırısına uğramış geleneksel betonda kullanılan Portland çimentosundaki  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve kalsiyum sülfü alüminatların çözülmesi ve C-S-H jelinde meydana gelen dekalsifikasyon ile oldukça boşluklu korozyona uğramış bir tabaka veya kolayca yerinden kopan bir yüzey meydana gelir (Provis vd., 2015). Bunun aksine, alkali ile aktive edilmiş olan YFC içerikli numunelerin hem asit saldırısına maruz kalmadan önceki geçirgenliğinin düşük olması hem de yapısındaki C-A-S-H formundaki bağlayıcı jeller düşük  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  oranına sahip olmasından dolayı

dekalsifikasyona uğrasa bile geride iyi durumda olan bir alümina silikat tabaka bırakır (Lloyd vd., 2012; Bernal vd., 2012b). Çimento ve betonların asitten kaynaklanan bozulma miktarını ifade etmek için korozyon derinliği ve kütle kaybı parametreleri kullanılmaktadır. Lloyd vd. (2012) bulgularına göre düşük Ca içerikli bağlayıcı malzemelerin alkali ile aktive edilmesi sonucu oluşan jeopolimer bağlayıcılarda korozyon derinliği asit etkisinin belirlenmesinde kütle kaybından daha önemli olmaktadır. Bunun nedeni, bu bağlayıcılarda meydana gelen N-A-S-(H) türü jellerin görünüşte bozulmamış olmasına rağmen boşluklu ve dayanım kaybına uğramış olması ve bağlayıcı ürünün tamamen bozulması yerine reaksiyon ürünlerinin bağlayıcı yüzeyinde bir tabaka halinde birikmesidir.

Yapılan diğer bir çalışmada, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılar ve Portland çimento pastası pH değeri 3 olan HNO<sub>3</sub> çözeltisine 580 gün boyunca daldırılmış ve YFC esaslı bağlayıcılar ile çimento pastasının korozyon derinlikleri gözlenmiştir. Çalışmada, korozyon derinliği alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda 1.3 mm ve çimento pastasında 2.5 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların HNO<sub>3</sub> çözeltisine dayanıklılığının çimento pastasına göre daha iyi olduğu göstermiştir (Shi ve Stegemann, 2000). Ancak, başka bir çalışmada HCl çözeltisine daldırılan alkali ile aktive edilmiş UK içeren jeopolimer bağlayıcılardaki N-A-S-(H) jelindeki alüminyumun jeli terk etmesi ile bağlayıcılardaki zeolit yapısının bozulabildiği rapor edilmiştir (Fernandez-Jimenez vd., 2006).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılardaki yüksek alkali içeriği nedeniyle bu bağlayıcıların alkali silika reaksiyonu oluşumu için daha yüksek potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir (Shi vd., 2015). Ancak, birçok çalışmada alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçlarda alkali agrega reaksiyon ürünleri elektron mikroskopunda gözlenmiş ve aynı koşullarda bulunan geleneksel Portland çimentolu betona kıyasla daha az genişleme olduğu rapor edilmiştir (Gifford ve Gillott, 1996; Yang vd., 1999). Bu çalışmaların yanında, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarla birlikte düşük Ca içeren UK veya metakaolin belirli oranlarda kullanılarak bağlayıcılar üretilmiş ve bu malzeme içerikleri ile birlikte reaktif silis içeren agregalarla yapılan deney sonuçlarında bile çok az ve ihmal edilebilir düzeyde genişleme gözlenmiştir (Krivenko vd., 2010; Lu vd., 2014).

### 3.4.3 Su emme ve geçirgenlik

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların su emme ve geçirgenlik özellikleri kullanılan bağlayıcı malzemelerin türü ve içeriği gibi birçok faktöre bağlıdır. YFC malzemesinin alkali ile aktive edildiği bazı çalışmalarda YFC içeriğinin belirli bir seviyeye ( $500 \text{ kg/m}^3$ ) kadar artması ile birlikte toplam boşluk hacminin ve geçirgenliğin azaldığı gözlenmiştir (Rodriguez vd., 2008; Bernal vd., 2011b). Çok yüksek bağlayıcı malzeme dozajının yüksek hidrasyon ısısına ve mikro çatlak oluşumuna neden olabileceği, bunun da elde edilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların geçirgenliğini artırabileceği düşünülmektedir (Zhang vd., 2017). Deneysel çalışmalar, alkali ile aktive edilmiş YFC ile metakaolin ikili karışımlarında belirli bir seviyeye kadar metakaolin içeriğinin su emme ve geçirgenliği azaltabileceğini göstermiştir (Bernal vd., 2012a, Bernal vd., 2010a). YFC ile UK ikili karışımları ile yapılan çalışmalarda UK içeriğinin alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların boşluk hacmini ve geçirgen boşluk miktarını artırdığı, ancak boşlukların birbirleriyle olan bağlantısını azalttığı görülmüştür (Gao vd., 2016; Provis vd., 2012). UK içeriğinin geçirgen boşluk miktarını artırmasının başlıca nedeni olarak N-A-S-(H) jelinin boşluklu yapısı olduğu düşünülmektedir (Ismail vd., 2014). YFC ile UK karışımının alkali ile aktive edilmesiyle elde edilen bağlayıcıların geçirgen boşluk hacmi, karışımdaki UK oranının %50 den daha fazla olduğu durumlarda geleneksel Portland çimentosuyla üretilen betonlara göre daha fazla olmaktadır (Ismail vd., 2013c). YFC yerine ağırlıkça %10 mikro silika kullanılması alkali ile aktive edilmiş YFC içeren harçların su emme kapasitesini ve suyun penetrasyon derinliğini azaltmıştır (Rostami ve Behfarnia, 2017; Behfarnia ve Rostami, 2017). Aktive edilecek bağlayıcı malzemenin türü ve içeriğinin yanında alkali içeriği ve konsantrasyonunun da alkali ile aktive edilmiş malzemelerin su emme ve geçirgenlik özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Yapılan çalışmalar, alkali ile aktive edilmiş YFC içeren betonların ve UK ile üretilen jeopolimer betonların Ms modülü 0.75 ten 1.00'e çıktığında betonların su emme miktarlarının azaldığını göstermiştir. Ancak Ms modülü değeri 1.00 den 1.25 e çıktığında ise UK ile üretilen jeopolimerlerin su emme değerleri biraz azalırken, YFC içeren betonların su emme değerlerinde önemli derecede artış olmuştur (Adam, 2009; Law vd., 2012). UK ile üretilen jeopolimer bağlayıcılardaki silika ve alkali içeriğinin artması toplam boşluk hacminde azalmaya, boşlukların boyutlarında küçülmeye ve düşük su geçirgenliğine neden olmaktadır (Ma vd., 2013). Su:bağlayıcı oranının artması ile birlikte artan boşluk hacmi, boşluk boyutu ve mikro yapıda meydana gelen çatlaklar nedeniyle metakaolin ile



üretileen jeopolimerlerin (Okada vd., 2009), düşük kalsiyumlu UK ile üretileen jeopolimerlerin (Olivia ve Nikraz, 2011) ve pirinç kabuğu külü ile üretileen inorganik polimer betonların (Wongpa vd., 2010) su emme ve geçirgenlik değerlerinde önemli artışlar gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş UK esaslı bağlayıcıların sıcak kür koşullarında uzun süre bekletilmesinin, elde edilecek jeopolimer bağlayıcının gözenek yapısı üzerinde belirgin bir yararı olmakla birlikte su geçirgenliğini de önemli ölçüde azaltmaktadır (Ma vd., 2013). Kür yaşı arttıkça alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı veya metakaolinli bağlayıcılardaki meydana gelen jellerin sıklıkları artmakta ve olgunlaşan bu jellerde birbiriyle bağlantılı gözenek miktarında azalma olmaktadır. Böylece kür yaşı ile birlikte bu bağlayıcıların su emme kapasiteleri azalabilmektedir (Bernal vd., 2012a). Çizelge 3.2’de UK, YFC ve bunların ikili karışımlarının alkali ile aktive edilmesiyle elde edilen bağlayıcıların su emme ve geçirgenliklerinin çeşitli faktörlere bağlı olarak Portland çimentosuyla üretileen betonlarla kıyaslandığı bazı çalışmalar özetlenmiştir. Çizelge 3.2’deki faktörlere göre elde edilen bağlayıcıların su emme ve geçirgenlikleri geleneksel betona göre daha yüksek ya da düşük olabilmektedir.

**Çizelge 3.2.** Alkali ile aktive edilmiş malzemelerin su emme ve geçirgenlikleri (Zhang vd., 2017)

Bağlayıcı malzeme türü	Su emme ve geçirgenliği etkileyen faktör	Aktivatör türü	Geleneksel betona göre su emme ve geçirgenlik
Yüksek fırın cürufu	Ms modülü	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Yüksek su emme
Uçucu kül	Kum olarak kullanılan bakır cürufu	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Yüksek su emme ve geçirgenlik
Yüksek fırın cürufu	Aktivatör konsantrasyonu, Ms modülü, dozaj	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ; NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Düşük su emme
Uçucu kül	Çelik fiber içeriği	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Düşük su emme ve geçirgenlik
Uçucu kül	Kum olarak kullanılan kurşun cürufu	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Yüksek su emme ve geçirgenlik
Yüksek fırın cürufu + uçucu kül	Aktivatör konsantrasyonu; Cüruf:Uçucu Kül oranı	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Düşük su emme ve geçirgenlik
Yüksek fırın cürufu + uçucu kül	Aktivatör konsantrasyonu; Cüruf:Uçucu Kül oranı; su:bağlayıcı oranı	NaOH + Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Yüksek su emme ve geçirgenlik

### **3.5. Alkali ile Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon Uygulamalarını Etkileyen Faktörler**

#### **3.5.1 İncelik**

Alkali ile aktive etme amacıyla kullanılan bağlayıcı malzemelerin inceliği, bu malzemelerin reaksiyona girme eğilimini, dayanım gelişimini, elde edilecek alkali ile aktive edilmiş bağlayıcının nihai mikro yapısını ve priz sürelerini etkileyen önemli bir faktördür. Yapılan bazı çalışmalarda alkali ile aktive edilmiş malzeme elde etmek için kullanılan YFC malzemesinin incelik değerinin en uygun 400 m<sup>2</sup>/kg ile 550 m<sup>2</sup>/kg arasında olduğu rapor edilmiştir (Wang vd., 1994; Puertas vd., 1995). F sınıfı UK ile jeopolimer üretilen deneysel bir çalışmada, jeopolimerin özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerin UK ile üretilen jeopolimerler için UK inceliğinin, Si/Al oranının, aktivatör dozajının ve özelliğinin olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışmada, 43 mikrondan daha küçük tane boyutuna sahip UK ile yüksek  $f_c$  değerlerine ulaşılabildiği belirtilmiştir (Kopljenović vd., 2010).

#### **3.5.2 Kür koşulları**

Düşük kalsiyumlu jeopolimer tipi bağlayıcıların yeterli dayanım ve mikro yapı gelişimi için genellikle yüksek sıcaklıklarda kür gerektiği yapılan çalışmaların birçoğunda ortaya konmuştur. Bu durum, elde edilen jeopolimer ürünün büyük ölçekli endüstriyel projelerde kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır (Bernal ve Provis, 2014). Ancak bazı çalışmalarda ortam sıcaklığı veya ortam sıcaklığına yakın kür koşullarında çok başarılı dayanım gelişimi elde edilebilmiştir (van Deventer vd., 2012). Yapılan bir çalışmada, 23 °C’de kür edilen 50 mm boyutlarındaki küp harç numunelerin 28 günlük  $f_c$  değerleri 60 MPa değerine kadar ulaşmıştır (Provis vd., 2014). Ortam sıcaklığında bu dayanım gelişiminin elde edilebilmesi için üç temel parametrenin yerine getirilmesi gerektiği rapor edilmiştir. Bunlardan ilki, karışım tasarımlarının mümkün olduğunca düşük su:bağlayıcı oranı ile yapılmasıdır, aksi takdirde priz ve dayanım gelişimi gecikecektir. İkincisi, aktive edilecek malzemenin kimyasına uygun aktivatör bileşimi ve konsantrasyonu ayarlanmasıdır. Bu parametre gerektiği şekilde uygulanamazsa, elde edilecek ürünün dayanım gelişimi yetersiz aktivatör dozajı nedeniyle yavaş olur veya gerektiğinden fazla aktivatör çiçeklenmeye neden olabilir. Sonuncusu da, rötre veya mikro çatlak oluşumunu

engellemek için kür işleminin mümkün olduğunca malzemedeki su ve diğer sıvıların buharlaşmasını engelleyecek şekilde malzeme tecrit edilmek suretiyle uygulanmasıdır (Bernal ve Provis, 2014). Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda mikro çatlak oluşumunu azaltmada otojen kürün de etkili olabileceği rapor edilmiştir (Sakulich ve Bentz, 2013).

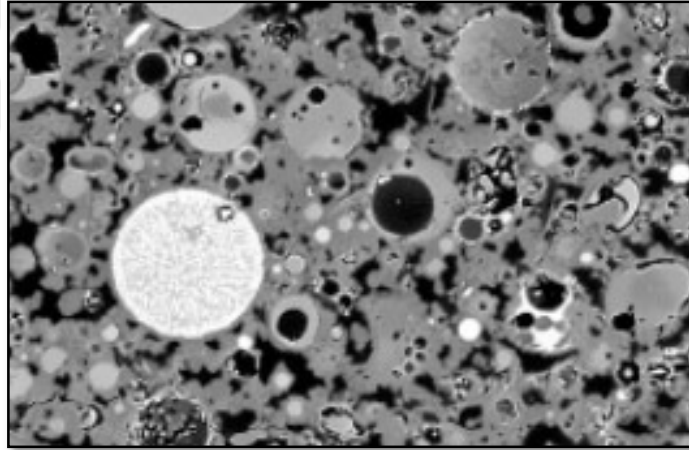
### 3.5.3 Aktivatör türü, miktarı ve Ms modülü

Yapılan bazı çalışmalarda alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonlarda en yüksek  $f_c$  değeri ve en düşük su emme değerlerine Ms değeri 1 olan betonlarda ulaşılrken, UK ile üretilen jeopolimer betonlarda Ms değerinin 1.25 olan betonlarda ulaşılmıştır (Adam, 2009; Law vd., 2012). UK malzemesinin aktive edildiği bir çalışmada kullanılan alkalilerin  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranı 0.2, 0.3 ve 0.4 olarak ayarlanarak hamur ve harç numuneleri üretilmiştir. Deneysel çalışmada, en yüksek  $f_c$  değerleri  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  oranı 0.4 olan numunelerde gözlenmiştir. Bu numunelerin 180 günlük  $f_c$  değerlerinin ise 20 MPa olduğu rapor edilmiştir (Vargas vd., 2011). YFC ile metakaolin ikili karışımlarının alkalilerle aktive edildiği bir çalışmada, kullanılan aktivatörlerin silika içeriği arttıkça elde edilen bağlayıcıların mekanik performansları azalmıştır (Bernal vd., 2011a). UK malzemesinin sodyum silikat ve NaOH ile aktive edilip jeopolimer bağlayıcıların elde edildiği bir çalışmada üretilecek bağlayıcıların Ms modülü 3.2 olarak belirlenmiş ve 5 M, 10 M ve 15 M olmak üzere üç farklı derişimde NaOH kullanılmıştır. Dökümden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılan numuneler 65 °C de 48 saat kür edilmiştir. Bağlayıcılardan elde edilen  $f_c$  değerleri NaOH konsantrasyonuna göre önemli derecede değişmiş, en yüksek  $f_c$  değerlerine 10 M NaOH kullanılan numunelerde ulaşılmıştır (Rattanasak ve Chindaprasirt, 2009).

### 3.6 Uçucu Külün Jeopolimerizasyonu

UK malzemesi çoğunlukla alkali hidroksit veya silikat solüsyonlarıyla aktive edilir. Düşük kalsiyumlu UK malzemesinin alkali ile aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı jel metakaolin esaslı jeopolimer jelde olduğu gibi dörtyüzlü N-A-S-(H) tipinde birbirine çapraz bağlı bir yapıdır (Provis vd., 2009b; van Deventer vd., 2007). Alkali hidroksitlerle aktive edilen UK esaslı jeopolimer bağlayıcılara genellikle sıcak kür veya buhar kürü uygulanmaktadır, çünkü bu bağlayıcı sistemlerinin oda sıcaklığındaki dayanım

gelişimleri yavaştır (Criado vd., 2005; Palomo vd., 2004). Termal küre tabi tutulmuş NaOH ile aktive edilen UK esaslı bağlayıcılardaki düzensiz yığın haldeki jelin yapısında XRD ile tanımlanabilen kabazit Na, fojasit, sodalit grubu ve kankrinit grubu gibi ikincil fazlar meydana gelebilmektedir (Criado vd., 2007; Oh vd., 2010; Rees vd., 2007a). Şekil 3.3’de gösterilen örnekte olduğu gibi alkali ile aktive edilmiş UK esaslı bağlayıcı mikro yapısının oldukça heterojen olmasına ve yapısal düzensizliğine rağmen UK bazlı alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların bağ yapısını ve kimyasını son zamanlarda FTIR analizleri ile geliştirilen uygulamalarla hem yüzeysel hem de hacimsel olarak tanımlayabilmek ve anlayabilmek mümkün hale gelmiştir (Rees vd., 2007a; Rees vd., 2007b). Fernandez-Jimenez ve Palomo (2005), UK esaslı jeopolimerlerin reaksiyon mekanizmasını FTIR analizleri ile araştırdıkları çalışmada bu jeopolimerlerdeki jel oluşumunun iki aşamalı olarak meydana geldiğini gözlemişlerdir. İlk aşamada jel alüminyumca zengin iken, ikinci aşamada Si içeriğinin daha fazla dâhil olduğu bir jel gözlenmiştir.

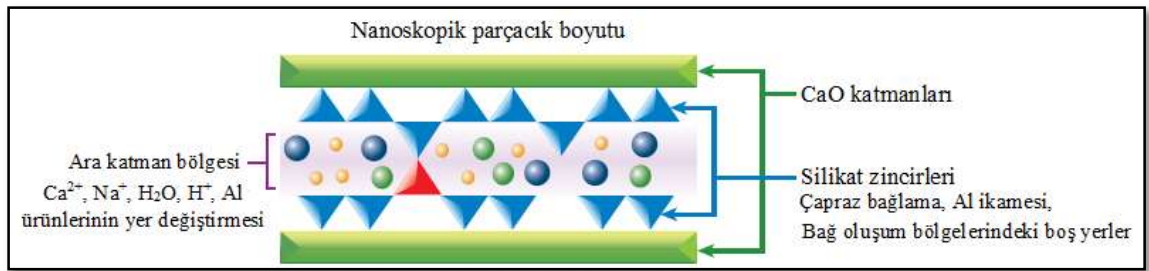


**Şekil 3.3.** Uçucu küllü jeopolimer üzerinde yapılmış bir SEM analizi (Das vd., 2015)

### **3.7 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Alkali İle Aktivasyonu**

YFC malzemesinin alkali ile aktivasyonu sonucu oluşan reaksiyon ürünlerinin araştırıldığı çalışmalarda ana reaksiyon ürününün tobermoritin (C-S-H) düzensiz yapıları olanı şeklinde tarif edilen C-A-S-H tipi bir jeldir. Bu jelin nano boyutta sembolik gösterimi Şekil 3.4’de verilmiştir. Şekildeki mavi üçgenler dört yüzlü Si atomlarını, kırmızı üçgen ise bir bağda Si yerini alan Al olarak ifade edilmiştir. Kürecikler ise ara katmandaki çeşitli atom türlerini göstermektedir (Provis ve Bernal, 2014). Kullanılan aktivatörden bağımsız olarak, YFC malzemesinin alkali ile aktive edilmesiyle elde edilen

C-A-S-H jeli, içeriğindeki Ca:Si oranı 1.5 ile 2.0 arasında olan hidrate Portland çimentosuna göre daha düşük kalsiyum içermektedir. NaOH ile aktive edilen YFC malzemesinde meydana gelen C-A-S-H jeli silikatlarla aktive edilen YFC ile aynı türdeki jele göre genellikle daha yüksek bir Ca/(Si + Al) oranına ve daha düzenli bir nano yapıya sahiptir (Escalante-Garcia vd., 2003). Şekil 3.4’de de görüldüğü üzere kalsiyum ve silisin yerini sırasıyla alkalilerin ve alüminyumun alması nedeniyle C-A-S-H jellerinde nano ölçekte bir yapısal bozukluk meydana gelmesi olasıdır (Puertas vd., 2011). Alüminyum Şekil 3.4’de kırmızı üçgeni temsilen hem dört yüzlü silikat zincirlerine dâhil olur ve silikat zincirlerini çapraz olarak birbirine bağlar hem de ara katman bölgesinde yer alabilir. Silikat zincirlerinin birbirine çapraz bağlanması daha zayıf bir jel yapısının meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu yüzden silikat zincirlerinin çapraz bağlanmasını azaltmak için bağlayıcı malzemelerdeki toplam Al/Si oranını 0.2 ile sınırlamak gereklidir (Myers vd., 2013). C-A-S-H jellerine  $Mg^{+2}$  iyonunun dahil olması da istenen bir durum değildir çünkü  $Mg^{+2}$  iyonunun iyonik yarıçapı nedeniyle tobermorit türü yapıdaki  $Ca^{+2}$  iyonu ile iyi bir eşleşme meydana getiremez. Yüksek oranda Al ve/veya Mg içeren YFC malzemesinin alkali ile aktivasyonu sonucu meydana gelen C-A-S-H jeli Şekil 3.2’de sol tarafta da gösterildiği gibi Al ve/veya Mg bakımından zengin ikincil reaksiyon ürünleri içerir. Yaygın olarak görülen ikincil reaksiyon ürünleri AFm grubu katmanlı sulu kalsiyum alüminatlar, hidrotalsit benzeri (Mg, Al) çift katmanlı hidroksitler ve/veya düşük MgO varlığında meydana gelen gismondin ve garonit gibi zeolitlerdir (Provis ve Bernal, 2014).



**Şekil 3.4.** C-A-S-H jelinin nano boyutta sembolik gösterimi (Provis ve Bernal, 2014)

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların jel yapılarına alkalilerin oldukça önemli bir etkisi vardır. Çünkü bu bağlayıcı sistemler genellikle 1 kiloda 1-2 mol olmak üzere 5 mol/kg’a kadar çıkabilen miktarda yüksek alkali konsantrasyonuna sahiptir. Özellikle  $Na_2O$  olmak üzere alkali oksitlerin C-A-S-H jellerinin bileşimine ve mikro yapısına olan etkisi üzerine

birçok çalışma yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar neticesinde alkali solüsyonlar ile katı bağlayıcı bileşenlerden gelen iyonlar arasında yüksek pH ortamında meydana gelen etkileşim üzerine ve özellikle alkalilerin bağlayıcı jel tarafından bağlanmasına Al iyonunun etkisi hakkında halen bir görüş birliği oluşmamıştır (Provis ve Bernal, 2014).

### 3.8 Alkali İle Aktive Etme ve Jeopolimerizasyon ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Rashad (2013) çalışmasında, literatürdeki alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmaları incelemiş ve bu çalışmalardan elde edilen kazanımları özetlemiştir. Yapılan çalışmalar, polipropilen liflerin alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların mekanik özelliklerini ve donma-çözülme dayanıklılığını olumlu yönde etkilemediğini göstermiştir. Çalışmalarda, çelik fiber ilavesinin alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların su emme, geçirgenlik;  $f_c$ ,  $f_{fs}$  ve çekme dayanımı özelliklerini geliştirdiği vurgulanmıştır. Karbon lif ilavesi alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların  $f_c$  değerlerini artırmış ve kuruma büzülmesini azaltmıştır. Buna karşın, cam lifler alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların mekanik özelliklerini olumsuz etkilerken, büzülme değerlerini azaltmıştır. Naftalin esaslı süperakışkanlaştırıcılar, aktivatörün tipine ve miktarına bağlı olarak alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların işlenebilirliğini geliştirmiş,  $f_c$  değerlerini artırmış, priz başlama ve bitiş sürelerini uzatmıştır. Naftalin formaldehit esaslı süperakışkanlaştırıcıların alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların  $f_c$  değerlerini azaltması ve kuruma büzülmesini artırması nedeniyle bu bağlayıcılarda kullanımı uygun bulunmamıştır. Hava sürükleyici katkıların alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda kullanımı  $f_c$  değerlerinde bir kayba neden olmadan işlenebilirliği artırması ve kuruma büzülmesini azaltması nedeniyle çeşitli araştırmacılar tarafından uygun bulunmuştur. Rötire azaltıcı katkıları ve priz geciktirici katkıları 2 günlük alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerini azaltmıştır. Priz geciktiricilerin  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerine önemli bir etkisi gözlenmezken, rötire azaltıcılar  $f_{fs}$  değerlerini artırmış,  $f_c$  değerlerini etkilememiştir. Rötire azaltıcı katkıları ve priz geciktirici katkıları alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların kuruma büzülmesini azaltmıştır. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda silis dumanı içeriği işlenebilirliği azaltmış,  $f_c$  değerlerini artırmıştır. Silis dumanının YFC yerine ikame oranı optimum olarak %5 ile %10 arasında olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca silis dumanının bu pozitif etkisinin nedeni olarak da matris içerisindeki C-S-H jel yoğunluğunu artırması ve matrisin boşluk yapısını olumlu yönde değiştirmesi

olarak gösterilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda UK içeriği işlenebilirliği artırmış ve prizi geciktirmiştir. Araştırmacıların çoğu alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda UK içeriğinin  $f_c$  değerlerini azalttığını belirtse de, diğer bazı araştırmacılar optimum UK oranı, aktivatör tipi, aktivatör oranı ve kür koşulları gibi birçok faktöre bağlı olarak UK ile birlikte ikili karışım halinde aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda en yüksek  $f_c$  değerlerine ulaşılabileceğini rapor etmişlerdir. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda metakaolin içeriğinin priz süresini geciktirdiği ve hidrasyon ısısını azalttığı gözlenmiştir. Bazı araştırmacılar aktivatör tipine ve konsantrasyonuna bağlı olarak YFC ile birlikte YFC yerine ağırlıkça %20 metakaolin içeriği ile en yüksek  $f_c$  değerlerine ulaştıklarını belirtse de, diğer bazı araştırmacılar metakaolin içeriği ile birlikte alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcıların  $f_c$  değerlerinde azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Bazı araştırmacılar alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda metakaolin içeriğinin geçirimsizliği artırdığını belirtmişler, diğer bazı araştırmacılar ise yüksek aktivatör konsantrasyonunda metakaolin içeriğinin klor geçirgenliğini çoğu durumda azalttığı sonucuna varmışlardır. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda metakaolin içeriği karbonasyon derinliğini artırmış, toplam gözenek hacmini artırmış ve karbonatlaşmaya maruz kalan bağlayıcılarda  $f_c$  değerlerini azaltmıştır.

Özodabaş ve Yılmaz (2013), yaptıkları çalışmada çok ince öğütülmüş pomzanın alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların dayanım ve dayanıklılığına etkisini araştırmışlardır. Aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat kullanmışlardır. Çalışmalarını iki aşamalı yapmışlar ve ilk aşamada aktivatör dozajının  $f_c$  değerlerine etkisini araştırmışlar, ikinci aşamada ise tespit edilen optimum aktivatör dozajı kullanılarak öğütülmüş pomzanın alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların dayanıklılık özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada %6, %7 ve %8  $\text{Na}_2\text{O}$  içeriği ile hazırlanan karışımlar içerisinde en uygun aktivatör oranı %8 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle öğütülmüş pomzanın alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların dayanıklılığına etkisinin araştırıldığı ikinci aşamada %8  $\text{Na}_2\text{O}$  içeren numuneler hazırlanmıştır. Toplam bağlayıcı miktarının %5 ve %10'u oranlarında öğütülmüş pomza kullanılarak ikinci aşamadaki karışımlar oluşturulmuştur. Öğütülmüş pomza içeriği alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların kuruma büzülmesini artırmıştır. Bu çalışmada; öğütülmüş pomza içeren ve içermeyen tüm numuneler  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{MgSO}_4$  çözeltilerine maruz bırakılmıştır.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  çözeltilisine maruz bırakılan tüm numuneler içerisinde en yüksek  $f_c$  değerleri %5

öğütülmüş pomza içeren numunelerde,  $MgSO_4$  çözeltisine maruz bırakılan tüm numuneler içerisinde ise en yüksek  $f_c$  değerleri %10 öğütülmüş pomza içeren numunelerde gözlenmiştir. Sonuç olarak; öğütülmüş pomza içeren ve içermeyen alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların kuruma büzülmesi ile  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bildirilmiştir. Ayrıca, pomza içeren harçların pomza içermeyenlere göre sülfatlara daha dayanıklı olduğu rapor edilmiştir.

Diğer bir çalışmada, farklı bağıl nem ortamlarında uzun bir kurutma işlemine tabi tutulan alkali ile aktive edilmiş YFC malzemesinin fiziksel ve kimyasal değişimleri araştırılmıştır. Sonuçlar, alkali ile aktive edilmiş YFC malzemesinin büzülme karakteristiklerinin büyük oranda bağıl neme bağlı olduğunu göstermiştir. Yüksek rölatif nem koşullarında, alkali ile aktive edilmiş YFC, belirgin şekilde viskoz bir yapıya sahip olmuş bunun nedeni olarak da C-A-S-H jellerinin oluşması olarak gösterilmiştir. Alkali ile mikro yapısı değişen YFC malzemesinin mikro gözeneklerinin kapandığı, yeni tabaka düzeninin oluştuğu ve silikat polimerizasyonunun meydana geldiği gözlenmiş ve bunların nedeni olarak da C-A-S-H jellerinin birbirleri ile olan güçlü bağ yapısı gösterilmiştir. C-A-S-H jellerinin yapısında bulunan alkali katyonların C-A-S-H jellerinin tabaka düzenini bozduğu ve C-A-S-H jellerinin kuruma nedeniyle daha kolay bozulmasına neden olduğu belirtilmiştir. Portland çimentolu bağlayıcılar kurumaya maruz bırakıldığında ise, bu bağlayıcılardaki nem kaybının alkali ile aktive edilmiş YFC malzemesine göre daha az olduğu belirtilmiştir (Ye ve Radlińska, 2016).

Bir çalışmada, alkali aktivasyon yöntemi ile elde edilmiş UK pastalarının özellikleri ve bu pastaların hafif agrega üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Hafif agrega elde edebilmek için sertleşmiş UK pastası granüle edilmiştir. Elde edilen hafif agregaların doygun yüzey kuru özgül ağırlığı 1.85, kuru özgül ağırlığı 1.66, su emme kapasitesi %11.8 ve birim ağırlığı  $972 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş UK ile elde edilen agregalarla üretilen betonun 28 günlük  $f_c$  değerinin 26.47 MPa olduğu ve bu betonların donma-çözülme döngülerine dayanıklı olduğunu belirtilmiştir. Çalışmada %3 CaO ve %92.3 den fazla  $Al_2O_3+SiO_2+Fe_2O_3$  içeriğine sahip olan ASTM'ye göre F tipi UK kullanılmıştır. UK malzemesini aktive etmek için sıvı sodyum silikat kullanılmıştır. Karışıma UK ile  $Ca(OH)_2$ 'in birbirleri ile reaksiyon kapasitesini artırmak ve UK içinde silikanın çözülmesini kolaylaştırmak için oksitleme maddesi olarak %98 saflıkta 12 mol NaOH ilave edilmiştir. Ayrıca, dayanımı artırmak için karışımların bir kısmında  $MnO_2$



ve az miktarda Portland çimentosu da kullanılmıştır. Bu çalışmada kür sıcaklığının etkisi de araştırılmış ve kür sıcaklığının artışı ile birlikte  $f_c$  değerinin genel itibariyle arttığı, optimum kür sıcaklığının ise 45 °C ile 60 °C aralığında olduğu ve 60 °C nin üstündeki kür sıcaklığının  $f_c$  değerleri üzerinde olumlu bir etkisinin olmadığı rapor edilmiştir. Sertleşmiş UK hamuru nominal maksimum agrega tane boyutu elde edilecek şekilde küçük parçalar haline getirilmiştir. Bu sayede, alkali ile aktive edilmiş UK pastasından elde edilen agregalarla doğal agregalar ve çeşitli yapay hafif agregalar  $f_c$  deneyine tabi tutulmuş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Doğal agregaların  $f_c$  değerlerinin yapay agregalara göre daha yüksek olduğu belirtilmiş, bunun nedeni olarak da yapay agregaların boşluklu yapısı gösterilmiştir. Doğal agregalarla üretilen betonun 28 günlük  $f_c$  değeri 33 MPa elde edilmiş, UK hariç diğer iki farklı hafif agregalarla üretilen betonların  $f_c$  değerleri de sırasıyla 23.9 MPa ve 22.4 MPa olarak elde edilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş UK ile elde edilen agregalarla üretilen betonun 28 günlük  $f_c$  değerlerinin normal agregalardan biraz daha düşük olmasının, UK agregasının daha çok hafif beton üretiminde kullanılacağı göz önünde bulundurulduğunda normal olduğu rapor edilmiştir. Aktivatör olarak kullanılan sodyum silikatın karışım içerisindeki ağırlıkça oranı %5 ile %20 arasında iken UK pastasının dayanımı artış göstermiş, %20 den sonra dayanım artışı durmuş, %3 ün altında olduğu zaman ise yeterli dayanım sağlanamamıştır. Sodyum silikatın karışım içerisindeki optimum miktarı ise %15 olarak belirlenmiştir. Oksitleme maddesi olarak kullanılan NaOH'ın optimum oranının ise %10 olduğu belirtilmiştir. Ağırlıkça %5 ve %10 oranlarında bazı karışımlara ilave edilen MnO<sub>2</sub> UK pastasının dayanımını en fazla 8.24 MPa kadar artırmış; %5 MnO<sub>2</sub> içeriği ile hazırlanan karışımlardan %10 MnO<sub>2</sub> ile hazırlanan karışımlara göre daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Sodyum silikat içeren ama MnO<sub>2</sub> içermeyen numunelerde sodyum silikat ve MnO<sub>2</sub> içeren numunelere göre daha yüksek  $f_c$  değerleri elde edilmiştir. UK malzemesinin dayanım kazanma hızı çimentoya göre daha yavaştır. Bu yüzden ilk günlerdeki dayanımı artırmak için bazı karışımlara %10 oranında çimento ilave edilmiştir. Bu uygulama ile dayanımda %5 artış sağlanmıştır. Bunun nedeni olarak da çimento ilavesi ile elde edilen erken oluşan hidrasyon reaksiyonları gösterilmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada alkali ile aktive edilmiş UK pastası ile elde ettikleri 50x50x50 mm boyutlarındaki numuneleri oda sıcaklığında hava, su ve nem kürü olmak üzere üç farklı kür metodu ile küre tabi tutmuşlardır. Su ve nem kürü ile kür edilen numunelerden hava kürü ile kür edilen numunelere göre %562'ye varan oranlarda daha yüksek  $f_c$  değerleri elde edilmiştir. Nem kürüne maruz bırakılan numunelerin ise hava

kürüne maruz bırakılan numunelere göre daha yüksek  $f_c$  değerine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu durum, kür metodunun alkali ile aktive edilmiş UK pastasının dayanım gelişimini önemli derecede etkilediğini göstermiştir (Jo vd., 2007).

Collins ve Sanjayan (1999) yaptıkları çalışmada alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonlarda tamamen suya doymun YFC agregasını normal ağırlıktaki iri agrega yerine kullanmışlar ve bu betonlarda içsel kürün etkisini araştırmışlardır. Gözenekli iri agregadan hidrate olmuş çimento hamuruna yavaşça salınan suyun betondaki içsel kürün devam etmesini sağladığını ve bu sayede çimento hamurunun daha fazla dayanıma ve daha az kuruma büzülmesine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kurumaya maruz bırakılan YFC agregası kullanılarak elde edilen betonların  $f_c$  değerlerinin normal ağırlıktaki agregalarla üretilen betonlara göre daha yüksek olduğu, kuruma büzülmesinin ise %40 kadar daha az olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca YFC agregası kullanılarak elde edilen betonların normal ağırlıktaki agregalarla elde edilen betonlara göre daha az işlenebilir olduğu belirtilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, çelik fiber içeren alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların erken yaşlardaki mekanik ve geçirimsizlik özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, üç seri halinde %0, %4 ve %12 oranlarında çelik fiber içeren Portland çimentolu geleneksel betonlar ve üç seri halinde de %0, %4 ve %12 çelik fiber içeren alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonlar olmak üzere toplam altı farklı seride betonlar üretilmiştir. Fiber içeriği, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonların ve Portland çimentosu ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde az da olsa bir düşüşe neden olmuştur. Ancak çelik fiber içeriği ile alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların 28 günlük  $f_{sts}$  değerlerinde 3.75 MPa ila 4.65 MPa arasında, 28 günlük  $f_{fs}$  değerlerinde ise 6.4 MPa ila 8.86 MPa arasında artışlar görülmüştür. Ayrıca, çelik fiber içeriği ile birlikte tüm beton numunelerin tokluğunun arttığı, su emme ve geçirgen boşluk miktarının azaldığı belirtilmiştir. Çelik fiber içeren alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonların mekanik özelliklerinin Portland çimentosu ile üretilmiş betonlara göre genel itibarıyla daha iyi olduğu rapor edilmiştir. Bu çalışma sonucunda araştırmacılar, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı betonların bir yapı malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için büyük bir potansiyele sahip olduğunu rapor etmişlerdir (Bernal vd., 2010b).

Mobili vd. (2016) yaptıkları çalışmada, metakaolin ve UK içeren alkali ile aktive edilmiş harçlar ile çimento esaslı harçları çeşitli deneylere tabi tutmuşlar; işlenebilirlik, dinamik elastisite modülü, boşluk yapısı ve buhar geçirimsizliği açısından birbirleri ile kıyaslamışlardır. Ayrıca, bu çalışmada harçların kapiler yolla su emme miktarları, kuruma büzülme hızları, sülfat dayanıklılıkları ve korozyon davranışları araştırılmıştır. UK malzemesini aktive etmek için aktivatör olarak sodyum silikat ile birlikte NaOH ve KOH ayrı ayrı kullanılmıştır. Metakaolini aktive etmek için ise sodyum silikat ile birlikte KOH ikame edilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların kuruma büzülmesi çimentolu harçlara göre daha yüksek iken kısıtlanmış rötre değerlerinin ise dinamik elastisite modüllerinin düşük olmasından dolayı daha az olduğu rapor edilmiştir. Metakaolin ve UK malzemesinin yüksek alkalinitesi sayesinde alkali ile aktive edilmiş harçlardaki donatılar korozyon açısından ilk bir ay pasif bir durum sergilemişler ancak bir aydan sonra ise alkali ile aktive edilmiş harçların korozyona karşı pasif olan yapısı değişmiş ve korozyon miktarı çimentolu harçlar ile yaklaşık aynı düzeyde olmuştur. NaOH içeriği, alkali ile aktive edilmiş UK içeren harçlarda çiçeklenme oluşumuna ve  $f_c$  değerlerinde artışa neden olmuştur. NaOH yerine alkali aktivatör olarak KOH kullanılması ile UK içeren harçlarda çiçeklenme olayı engellenmiştir. Alkali aktivatör olarak KOH içeren UK esaslı harçların dayanım kazanma hızı NaOH içeren UK esaslı harçların dayanım kazanma hızına göre daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bunun nedeni olarak da  $K^+$  iyonunun  $Na^+$  iyonuna göre jelleme daha hızlı ve güçlü bir şekilde difüzyonu olarak gösterilmiştir. Metakaolinin UK malzemesine göre daha hızlı polimerize olması nedeniyle, alkali ile aktive edilmiş metakaolinli harçlar UK esaslı harçlara göre daha hızlı dayanım kazanmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harçların dinamik elastisite modülünün çimentolu harçlara göre yaklaşık %50 daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Bu nedenle alkali ile aktive edilmiş harçların kısıtlanmış rötrelerinin de çimentolu harçlara göre daha düşük olduğu belirtilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların kuruma büzülmesi değerleri çimentolu harçlara göre daha yüksek elde edilmiş, bunun nedeni olarak da daha yüksek olan mezo gözenek hacmi gösterilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların çimentolu harçlara göre daha fazla buhar geçirgenliğine sahip olduğu, bunun nedeni olarak da UK esaslı harçların büyük boyutlu boşluklara sahip olması ve metakaolinli harçların toplam boşluk hacminin fazla oluşu gösterilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş metakaolinli harçlar çimentolu harçlara göre %60 daha fazla boşluk hacmine sahip olduğu için daha fazla su emmiş buna karşın alkali ile aktive edilmiş UK esaslı harçlar çimentolu harçlara göre %40 daha az boşluk hacmine

sahip olduğu için daha az su emmiştir. Ayrıca KOH ve kalsiyum alüminatlı çimento içeren UK esaslı harçların mükemmel derecede sülfata dayanıklı olduğu rapor edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, Ms modülü 1.2 olan sodyum silikat kullanılarak %15.2 oranında Na<sub>2</sub>O ile aktive edilen metakaolin ile birlikte %0 ve %25 oranlarında UK kullanılarak üretilen jeopolimer hafif betonların özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada, hava ile alüminyum tozu eklenerek ve YFC agregası kullanılarak yoğunlukları 1200 kg/m<sup>3</sup>, 900 kg/m<sup>3</sup> ve 600 kg/m<sup>3</sup> olan betonlar elde edilmiş ve elde edilen betonlar 20°C ve 75 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta küre tabi tutulmuştur. Hedeflenen beton yoğunluklarını elde edebilmek için alüminyum tozu ağırlıkça %0.5 ile %1.7 oranları arasında karışımlara ilave edilmiştir. Betonların f<sub>c</sub> ve f<sub>ts</sub> değerleri araştırılmış ve yoğunluğun düşmesi ile birlikte dayanımların da düştüğü gözlenmiştir. Sıcak kür uygulanan (75 °C) betonların dayanım kazanma hızı daha fazla olmuştur. Termal iletkenliğin yoğunlukla beraber arttığı rapor edilmiştir. Kür sıcaklığının artışı ile birlikte betonların dayanım kazanma hızının arttığı ve buna bağlı olarak ilk günlerdeki dayanımlarının yüksek kür sıcaklığı ile birlikte daha yüksek olduğu belirtilse de ilerleyen günlerde 20 °C de kür edilen numunelerle 75 °C de kür edilen numunelerin dayanımlarının birbirine yakın değerler aldığı rapor edilmiştir (Aguilar vd., 2010).

Bilim Vd. (2015) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların özellikleri üzerine kullandıkları katkıların ve kür koşullarının etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, kimyasal katkı olarak “priz geciktirici ve süperakışkanlaştırıcı katkı” ve “rötre azaltıcı katkı” kullanılmıştır. YFC malzemesini aktive etmek için ise YFC ağırlığının % 4’ü ve % 6’sı oranlarında sodyum metasilikat kullanılmıştır. Harçların priz süreleri, kıvam kayıpları, rötre deformasyonları, karbonatlaşma miktarları, f<sub>c</sub> ve f<sub>ts</sub> değerleri araştırılmıştır. Harç karışımları 0.5 su:bağlayıcı oranı ve 3:1 kum bağlayıcı oranı ile oluşturulmuştur. Karışımlardan elde edilen tüm harç numuneleri dökümden 24 saat sonra kalıplarından çıkarılmıştır. Numunelerin bir kısmı 23 ±2°C’de ve %95 rölatif nem koşullarında (kür 1), bir kısmı 23 ±2°C’de ve %50 rölatif nem koşullarında(kür 2) ve diğer bir kısmı da su içerisine daldırılıp suyun sıcaklığı 2 saat içerisinde 65 °C’ye ulaşınca kadar ısıtılmış, bu sıcaklıkta 5 saat boyunca sabit tutulmuş ve bu 5 saatten sonra 23 ±2°C’de ve %50 rölatif nem koşullarında (kür 3) deney gününe kadar kür edilmiştir. Sonuçlar, kullanılan kimyasal katkıların alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların priz süreleri üzerine önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. Rötre azaltıcı

katkı ve özellikle de priz geciktirici ve süperakışkanlaştırıcı katkı normal Portland çimentosu ile üretilen harçların priz sürelerini uzatmıştır. Ayrıca, aktivatör dozajının artması ile YFC esaslı harçların priz başlangıç ve bitiş süreleri kısalmıştır. Kullanılan kimyasal katkıların harçların priz sürelerine olan etkisi, aktivatör oranının artması ile azalmıştır. Bunun nedeni olarak da aktivatör oranının artması ile birlikte harçlarda oluşan alkalın ortam olabileceği rapor edilmiştir. Priz geciktirici ve süperakışkanlaştırıcı katkı alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların akış hızını artırırken, rötre azaltıcı katkının harçların akış değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Harçların akma değerleri karışım suyunun buharlaşması ve bağlayıcı pastanın oluşumu gibi nedenlerden dolayı zamanla azalmıştır. Kimyasal katkılı veya katkısız alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların akma değerleri normal Portland çimentosu ile üretilen kontrol harcına göre daha az olmuştur. Rötre azaltıcı ile priz geciktirici ve süperakışkanlaştırıcı katkıların alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların karbonatlaşma derinliği üzerinde olan etkilerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu rapor edilmiştir. Priz geciktirici ve süperakışkanlaştırıcı katkı ve özellikle de rötre azaltıcı katkı harçların rötre değerlerini azaltmıştır. Na konsantrasyonunun artışı ile birlikte alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların rötre değerlerinde artış gözlenmiştir. Ek olarak, 2 günlük tüm numunelerde karbonatlaşmaya rastlanmamıştır. Kür 2 yöntemiyle kür edilen numunelerde 28 gün boyunca karbonatlaşmaya rastlanmamıştır. En yüksek 28 günlük karbonatlaşma değerleri Kür 2 koşullarında kür edilen numunelerde gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların  $f_c$  değerleri aktivatör içeriğinin artması ile birlikte kür yöntemi fark etmeksizin artmıştır. Kimyasal katkıların YFC esaslı ve normal Portland çimentolu harçların  $f_c$  değerlerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Uygulanan kür yöntemi alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı harçların  $f_c$  gelişimini önemli derecede etkilemiştir. Kür 2 koşullarında kür edilen tüm numunelerin  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerleri en düşük değerlerde elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak da kuru kür koşullarından dolayı karışım suyunun buharlaşması gösterilmiştir. Ayrıca,  $f_{fs}$  değerlerinin kuru kür koşullarından  $f_c$  değerlerine göre daha fazla etkilendiği tespit edilmiştir. Kuru kür koşullarında %4 Na dozajının YFC malzemesini aktive etmek için yeterli olmadığı ve %4 Na ile üretilen harçlarda çimento ile üretilen kontrol harcına göre daha düşük  $f_c$  değerleri elde edildiği rapor edilmiştir.  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de ve %50 rölatif nem koşullarında Na içeriği %4'den %6'ya çıkarıldığında ise kontrol harcına göre daha yüksek  $f_c$  değerleri elde edilmiştir. Kür 3 yöntemi YFC esaslı harçların erken yaşlardaki  $f_c$  değerlerini YFC malzemesinin aktivasyonunu hızlandırması nedeniyle artırmıştır. En yüksek 2 ve 7 günlük  $f_c$  değerleri

ve en yüksek 2 günlük  $f_{fs}$  değerleri Kür 3 yöntemi ile kür edilen numunelerden elde edilmiştir. Kür 3 yönteminde numuneler sudan çıkarılıp kuru kür koşullarına maruz bırakıldığında numunelerin  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerleri olumsuz etkilenmiştir. 7 günlük numunelerde en iyi  $f_c$  gelişimi Kür 1 koşullarında bekletilen numunelerde gözlenmiştir. En yüksek 7 ve 28 günlük  $f_{fs}$  değerleri Kür 1 yöntemi ile kür edilen numunelerden elde edilmiştir.

Thomas ve Peethamparan (2015) yaptıkları çalışmada, alkali ile aktive edilmiş UK veya YFC ile ürettikleri çimentosuz betonların çekme dayanımı, elastisite modülü, poisson oranı ve gerilme-deformasyon ilişkilerini araştırmışlar ve bağlayıcı olarak Portland çimentosuyla üretilen kontrol betonuyla kıyaslamışlardır. Ortam sıcaklığında (22 °C) kür edilen alkali ile aktive edilmiş UK ile üretilen betonların dayanımının daha yüksek sıcaklıkta (50 °C) kür edilenlere göre daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş UK ve YFC içeren betonların çekme dayanımının aynı  $f_c$  değerine sahip Portland çimentolu betonların çekme dayanımına göre önemli derecede daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş UK ve YFC içeren betonların poisson oranı aynı koşullardaki çimentolu betonların poisson oranının genel itibariyle 2:3'ü kadar olduğu rapor edilmiştir. UK ile üretilen betonların Young elastisite modülü değerleri  $f_c$  değerleri ile birlikte doğrusal olarak değişirken, YFC ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlarıki ise nispeten sabit kalmıştır. Alkali ile aktive edilmiş UK ile üretilen betonların gerilme-birim deformasyon davranışlarının çimentolu betonlarla benzer şekilde olduğu, maksimum gerilmeden sonra belirgin bir gerilme yumuşaması olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, YFC içeren betonların gerilme-birim deformasyon davranışlarının çalışmada üretilen diğer betonlara göre biraz daha lineer elastik ve kırılğan olduğu rapor edilmiştir.

Yapılan bir çalışmada, yüksek alkalın solüsyonları ile UK malzemesinin aktivasyon mekanizması araştırılmıştır. Bu solüsyonlar, NaOH, KOH ve cam suyu gibi yüksek OH<sup>-</sup> konsantrasyonuna sahip bileşenlerden oluşmuştur. Reaksiyon ürünü zeolitik bir yapıya benzer amorf alümina-silikat jelidir. Araştırmacılar, bağlayıcılara uygulanan kür süresi ve kür sıcaklığı ile bağlayıcılardaki solüsyon:UK oranı gibi değişkenlerin elde edilen bağlayıcıların mukavemetleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Aktivasyon reaksiyonu, bu çalışmada araştırılan parametrelerden belirgin bir şekilde etkilenmiştir. Örneğin, artan kür sıcaklığının alkali aktivasyon reaksiyonunu hızlandırıcı bir etki yaptığı belirlenmiştir.

Diğer değişkenler sabit tutulduğunda, artan kür sıcaklığının alkali ile aktive edilmiş UK malzemesinin mukavemetini artırıcı yönde etki ettiğini rapor etmişlerdir. Kür sıcaklığının etkisi özellikle erken yaşlarda (2 ve 5 saat) gözlenmiştir. 24 saatlik numunelerde ise kür sıcaklığının artması ile birlikte 2 ve 5 saatlik numunelerdeki dayanım artışına göre daha az dayanım artışı olmuştur. Ayrıca, kür süresinin uzaması ile birlikte dayanımda artış olduğu rapor edilmiştir. UK malzemesinin alkali ile aktivasyonu için kullanılan alkalin solüsyonlarının türünün de aktivasyon reaksiyonlarının gelişmesi açısından önemli olduğu vurgulanmıştır. Alkali solüsyonların hidroksitler yerine sodyum veya potasyum silikat gibi çözünebilir silikatlar içermesi, aktivasyon reaksiyonlarının daha hızlı gelişmesini sağlamıştır. Bu nedenle, çözünebilir silikatlarla aktive edilen numunelerin mekanik mukavemet kazanması hidroksitlerle aktive edilen numunelere göre daha çabuk olmuştur. Araştırmacılar, UK malzemesinin alkali aktivasyonu ile elde edilen amorf alümina-silikat ürününün, metakaolinin alkali ile aktivasyonu ile elde edilen ürün ile benzeyen bir çeşit zeolit olduğunu vurgulamışlardır. Alkali ile aktive edilmiş UK esaslı bağlayıcıların mukavemetini etkileyen önemli faktörlerin kür sıcaklığı ve aktivatör türü olduğu ve özellikle 2 saatlik numunelerde bu faktörlerin etkilerinin daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Solüsyon (aktivatör):UK oranının belirleyici bir parametre olmadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak; atık bir malzeme olan UK malzemesinin alkali ile aktivasyonu ile düşük sıvı:katı oranına sahip işlenebilirliği gayet iyi, bağ yapısı güçlü, seramiğe benzer camsı, parlak ve pürüzsüz bir malzeme elde edildiği rapor edilmiştir (Palomo vd., 1999).

Arbi vd. (2013), endüstriyel bir yan ürün olan YFC ile doğal bir kayaç olan diatomiti reaktif alüminyum kaynaklı kalsiyum alüminat çimentosu ile harmanlayarak oluşturdukları karışımları alkali ile aktive ederek yeni çimentolu malzemeler üretmişlerdir. Araştırmacılar, %20 kalsiyum alüminat çimentosu ve %80 YFC içeren birinci karışım ile %20 kalsiyum alüminat çimentosu ve %80 diatomit içeren ikinci karışımı sodyum sülfat ve sodyum hidroksit çözeltileri ile ayrı ayrı aktive ederek toplamda 4 farklı karışım üretmişlerdir. Sertleşmiş numuneler XRD ve NMR (nükleer manyetik rezonans) yöntemleri ile incelenmiştir. Ana reaksiyon ürününün etrenjit gibi kristal fazlar ile çökelmiş çimentolu jel olduğu belirtilmiştir. YFC harmanı orta derecede alkalin ortamda C-A-S-H yapısında jel oluşturmak üzere reaksiyon yapmış iken, diatomitin aynı alkalin koşullarındaki reaktivitesi çok düşük olmuştur. Yüksek alkalin ortamı (yüksek pH), YFC ve diatomitin kalsiyum alüminat çimentosu ile etkileşimini

artırmıştır. Çizelge 3.3’de karışım içeriği ve kullanılan aktivatör türü verilen karışımların 2 günlük  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerleri görülmektedir. En yüksek 2 günlük  $f_c$  değerleri %20 kalsiyum alüminat çimentosu ve %80 YFC içeren 8M NaOH ile aktive edilmiş numunelerde elde edilmiştir. Buna karşın kullanılan aktivatör türü fark etmeksizin M2 karışımlarından (M2NS ve M2NH) elde edilen numunelerden oldukça düşük  $f_c$  değerleri elde edilmiştir. Bunun nedeninin M2 karışımlarının yüksek sıvı:kati oranı veya diatomitin düşük yoğunluğu ve reaktivitesi olabileceği rapor edilmiştir. En yüksek  $f_{fs}$  değerleri ise %20 kalsiyum alüminat çimentosu ve %80 YFC içeren %6 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile aktive edilmiş numunelerden elde edilmiştir. XRD ve NMR incelemeleri sonucunda, M1 karışımlarından (M1NS ve M1NH) Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile aktive edilen orta dereceli alkalin ortamda üretilen numunelerde C-A-S-H jeli ve sülfalüminatlar görülürken, M2 karışımlarından elde edilen numunelerde ise diatomitin tepkimeye girmemesinden dolayı sadece kalsiyum-alüminat çimentosunun hidrasyon ürünleri gözlenmiştir. M1 karışımlarından yüksek dereceli alkalin ortamda NaOH ile aktive edilen numunelerde N-A-S-(H) veya C-A-S-H jeli, kaoite ve karboalüminatların (C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>H<sub>11</sub>) oluştuğu gözlenmiştir. Diatomit, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ile elde edilen orta dereceli alkalin ortama göre, NaOH ile elde edilen yüksek dereceli alkalin ortamda daha reaktif davranış sergilemiştir. Buna rağmen, %80 Diatomit ile üretilen M2 karışımlarındaki düşük Al, Ca ve özellikle de Si içeriği yeterli miktarda bağlayıcı jel oluşumunu engellemiş ve M2 karışımlarından elde edilen numunelerin mekanik özelliklerinin zayıf olmasına yol açmıştır.

**Çizelge 3.3.** Karışımların 2 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerleri (Arbi vd., 2013)

arışım Kodu	Bağlayıcı Malzeme İçeriği	Kullanılan Aktivatör Türü	2 Günlük Eğilme Dayanımı, (MPa)	2 Günlük Basınç Dayanımı, (MPa)
M1NS	%20 Kalsiyum alüminat çimentosu + %80 Cüruf	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%6)	3.37 ± 0.2	10.73 ± 0.5
M1NH	%20 Kalsiyum alüminat çimentosu + %80 Cüruf	NaOH (8M)	2.4 ± 0.4	23.67 ± 2.5
M2NS	%20 Kalsiyum alüminat çimentosu + %80 Diatomit	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%6)	0.53 ± 0.07	2.5 ± 0.1
M2NH	%20 Kalsiyum-alüminat çimentosu + %80 Diatomit	NaOH (8M)	0.45 ± 0.05	1.21 ± 0.08

Yapılan bir çalışmada, çok hafif jeopolimer betonunun yük taşıma kapasitesi ve ısı yalıtımı özellikleri incelenmiştir. Üretilen jeopolimer beton karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak ağırlıkça %70 F sınıfı UK ve %30 YFC kuru karışımı, aktivatör olarak



da düşük konsantrasyona sahip (2M ile 3M arasında) NaOH solüsyonu kullanılmış ve istenilen akışkanlığı elde edebilmek için karışımlara süperakışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Çok hafif beton elde etmek için agrega olarak  $300 \text{ kg/m}^3$  ile  $540 \text{ kg/m}^3$  arasında yoğunluğa ve kapalı (su geçirgenliği az) bir dış yüzeye sahip genişletilmiş cam agregası kullanmışlardır. Sıvı:bağlayıcı oranının, bağlayıcı:agrega oranının ve hava sürükleyici katkı içeriğinin çok hafif jeopolimer betonun özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Sıvı dozajının  $140 \text{ l/m}^3$ 'den  $170 \text{ l/m}^3$ 'e çıkması işlenebilirliği önemli ölçüde geliştirmiş 10 mm olan çökme değeri bu değişim ile 280 mm'ye yükselmiştir. Ayrıca, su:bağlayıcı oranının artması ile birlikte daha düşük etüv kurusu yoğunluk, daha düşük 28 günlük  $f_c$  değerleri ve %15 ile %17 arasında artan boşluk içeriği nedeniyle daha düşük termal iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Bağlayıcı:agrega oranının artması ile birlikte 28 günlük  $f_c$  değerleri %25'e, taze beton yoğunluğu değerleri %17'ye, termal iletkenlik değerleri ise %58'e varan oranlarda artmıştır. Hava sürükleyici katkı içeriği betonların birim ağırlığını, termal iletkenliğini ve  $f_c$  değerlerini azaltmıştır. Çalışmada, ortalama  $f_c$  değeri 10 MPa olan ve çok iyi termal iletkenlik değerlerine ( $0.11 \text{ W/(mK)}$ ) sahip betonlar elde edilmiştir. Sonuç olarak, uygun işlenebilirliğe ve çok iyi termal özelliklere sahip çok hafif jeopolimer beton elde edilebileceği rapor edilmiştir (Huiskes vd., 2016).

## BÖLÜM IV

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada kullanılan malzemeler ile ilgili bilgiler ve bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki başlıklar altında detaylı bir şekilde verilmiştir. Bu çalışmada, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (YFC) ve termik santral uçucu külü (UK), sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ve NaOH (sodyum hidroksit) ile aktive edilerek çimentosuz harçlar üretilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçlardan hariç Portland çimentosu ile de kontrol harçları üretilmiştir. Portland çimentosu ile üretilen kontrol harcı ile birlikte toplamda 6 seride 58 farklı harç karışımı üretilmiştir. Üretilen harçların birim ağırlık,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ile  $f_c$  değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların özellikleri hem birbirleri ile hem de Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, seçilen harçlar üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara göre her seriden en iyi mekanik özelliklere sahip 2 karışım seçilerek bu harç karışımlarının bağlayıcı fazı (kum hariç diğer bileşenler) ile aynı bağlayıcı fazına sahip alkali ile aktive edilmiş hafif betonlar üretilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak çimentonun kullanıldığı geleneksel hafif betonlar (kontrol betonları) ile toplamda 11 farklı karışım ile hafif betonlar üretilmiştir. Hafif beton karışımlarında agrega olarak bazik pomza agregası (BPA) kullanılmıştır. Üretilen alkali ile aktive edilmiş hafif betonların mekanik, dayanıklılık ve mikro yapı özellikleri ortaya konulmuş, birbirleriyle ve kontrol betonlarıyla kıyaslanmıştır.

#### 4.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

##### 4.1.1 Çimento

Bu çalışmada kullanılan Portland çimentosu ÇİMSA Eskişehir Çimento Fabrikası'nda üretilmiştir. Kontrol harçları ve geleneksel hafif betonların (kontrol betonları) üretiminde kullanılan çimento, TS EN 197-1 (2012) standardına uygun, erken dayanımı yüksek CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosudur. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.06 ve inceliği  $3450 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dir. Karışımlarda kullanılan Portland çimentosunun kimyasal özellikleri ile ilgili bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Çimento, bağlayıcı malzemeler ve pomzanın kimyasal özellikleri

Oksit	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*K.K.
Çimento	19.45	4.5	2.7	63.70	1.22	2.84	0.54	0.42	3.85
YFC	32.47	9.94	1.25	32.45	9.31	0.82	0.85	0.31	2.77
UK	59.4	20.6	9.47	2.12	3.53	0.79	1.73	0.29	1.98
BPA	45.01	14.13	13.70	8.82	7.78	1.11	1.71	3.21	2.80

YFC: yüksek fırın cürufu, UK: uçucu kül, BPA: bazik pomza agregası, \*K.K.: Kızdırma kaybı

#### 4.1.2 Uçucu kül

Deneysel çalışmada alkali ile aktive etmek amacıyla bağlayıcı malzeme olarak kullanılan UK malzemesi Selka Hazır Beton Tic. ve San. AŞ.'den temin edilmiş olup Tunçbilek Termik Santrali atığıdır. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı elde edebilmek amacıyla bağlayıcı malzeme olarak kullanılan UK malzemesinin kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan UK, TS EN 197-1 (2012) standardına göre V sınıfı UK sınıfına, ASTM C 618-17a (2017) standardına göre de F sınıfı UK sınıfına uygundur. UK malzemesinin özgül ağırlığı 2.4 ve özgül yüzeyi ise 3612 cm<sup>2</sup>/g'dır.

#### 4.1.3 Ögütülmüş granüle yüksek fırın cürufu

Deneysel çalışmada alkali ile aktive etmek amacıyla bağlayıcı malzeme olarak kullanılan YFC, Karçimsa Çimento Sanayi ve Ticaret AŞ'den sağlanmış olup, kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan YFC, Karabük Demir Çelik Fabrikası atığıdır. YFC malzemesinin özgül ağırlığı 2.86 ve özgül yüzeyi 3996 cm<sup>2</sup>/g'dır. Çalışmada kontrol harcı ve betonu üretimi için kullanılan çimento ile alkali ile aktive edilmiş harç ve beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan YFC ve UK malzemelerinin görünüşleri Fotoğraf 4.1 de sunulmuştur.



**Fotoğraf 4.1.** Çimento, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu

#### 4.1.4 Sodyum silikat

YFC ve UK bağlayıcı malzemelerini aktive etmek amacıyla kullanılan sodyum silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Suda çözünebilen bir malzeme olan sodyum silikat, cam suyu veya su camı olarak da bilinir. Seramik başta olmak üzere birçok alanda kullanılan sodyum silikat yüksek erime noktasına sahip bir bileşiktir. Temini kolay ve ucuzdur. Bu deneysel çalışmada sulu çözelti halinde temin edilen sodyum silikatın özellikleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Sodyum silikatın kimyasal özellikleri

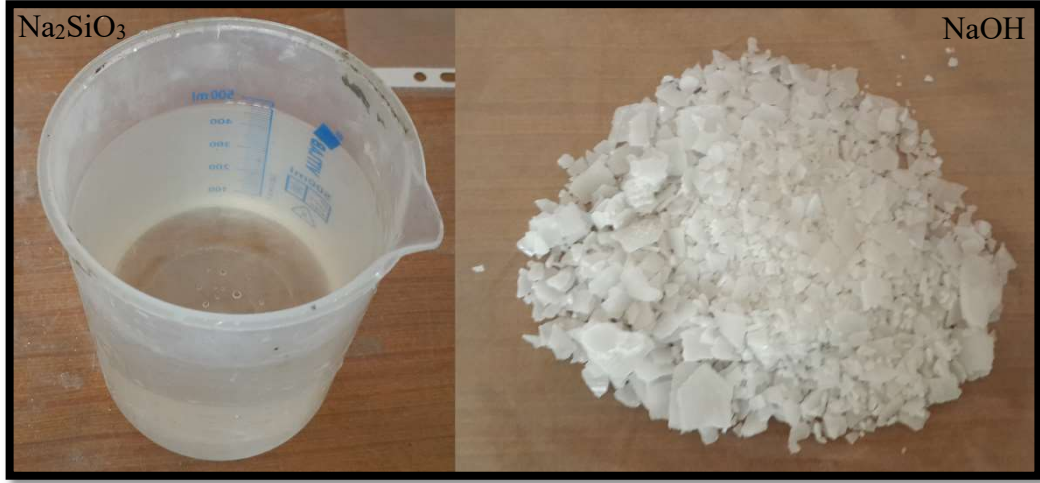
Kimyasal Formül	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$
Molekül Ağırlığı	63.94 g/mol
Yoğunluk	1.39 g/cm <sup>3</sup>
$\text{Na}_2\text{O}$	% 8.9
$\text{SiO}_2$	% 28.7
Ph	11.31

#### 4.1.5 Sodyum hidroksit

Sodyum hidroksit (NaOH), çeşitli endüstri dallarında yaygın olarak kullanılan bir bileşiktir. Kostik adıyla da anılan NaOH, beyaz renkli, suda kolayca çözünebilen, nem absorbe etme kapasitesine sahip, kokusuz bir maddedir. Çözelti halinde iken sabuna benzer kayganlık hissi veren NaOH, insan cildinde kaşıntı meydana getirebilmektedir. Bu çalışmada YFC ve UK bağlayıcı malzemelerini aktive etmede kullanılan iki bileşikten biri olan NaOH, katı olarak Detsan Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'nden temin edilmiş ve karışım suyunda çözdürülerek kullanılmıştır. Kimyasal özellikleri Çizelge 4.3'de verilen NaOH, beyaz renkli ve pul şeklindedir. Çalışmada kullanılan NaOH ve sodyum silikatın görünüşleri Fotoğraf 4.2'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.3.** Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Formül	NaOH
Molekül Ağırlığı	40.0 g/mol
Asidimetrik	% 98.51
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	% 0.32
NaCl	% 0.019
Fe	6 ppm



**Fotoğraf 4.2.** Sodyum silikat ve sodyum hidroksit

#### 4.1.6 Harç karışımlarında kullanılan kum

Alkali ile aktive edilmiş harç karışımlarında ve kontrol harçlarında kullanılan CEN standart kumu Limak Trakya Çimento'dan temin edilmiştir. Harç karışımlarında kullanılan CEN standart kumunun görünümü Fotoğraf 4.3'de verilmiştir. CEN standart kumunun elek analizi ve TS EN 196-1 (2016) standardına göre sınır değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan CEN standart kumu TS EN 196-1 standardına uygun tane boyutu dağılımına sahiptir.



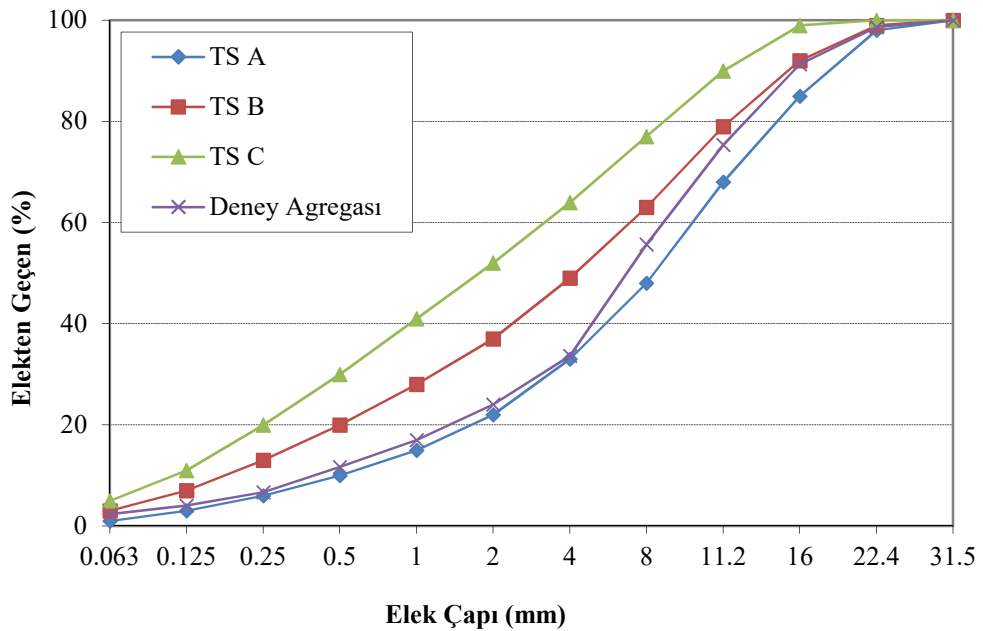
**Fotoğraf 4.3.** CEN standart kumu

**Çizelge 4.4** CEN standart kumunun elek analizi

Kare göz açıklığı (mm)	Kümülatif elekte kalan (%)	TS EN 196-1 sınır değerleri (%)
2.00	0	0
1.60	11	7 ± 5
1.00	36	33 ± 5
0.50	63	67 ± 5
0.16	84	87 ± 5
0.08	99	99 ± 1

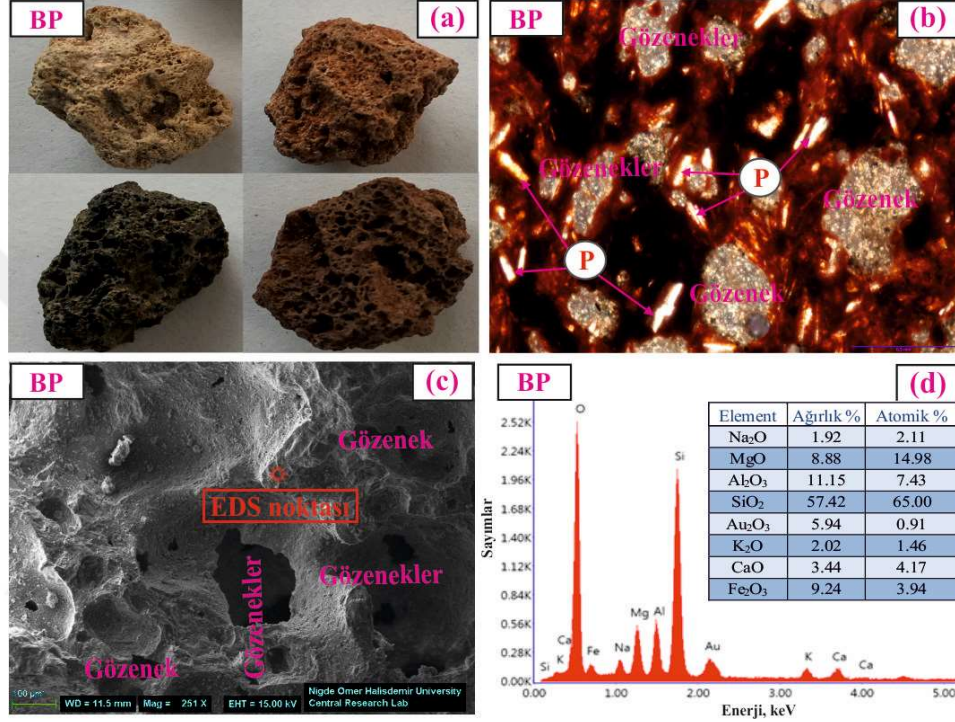
#### 4.1.7 Hafif agrega

Hafif beton karışımlarında hafif beton agregası olarak Aksaray'da bulunan Hasan Dağı'nın volkanik faaliyetleri sonucu meydana gelmiş olan bazik pomza agregası (BPA) kullanılmıştır. Aksaray Kum ve Pomza şirketinden temin edilen BPA malzemesinin kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. BPA malzemesinin özgül ağırlığı 2.77, tane yoğunluğu  $1.86 \text{ mg/m}^3$  ve ağırlıkça su emmesi % 8.55 olarak belirlenmiştir. Hafif beton karışımlarında kullanılan BPA malzemesinin en büyük dane çapı 16 mm'dir. TS 802 (2016) standardındaki elek analizi sınır değerleri ile karışımlarda kullanılan BPA malzemesinin (deney agregası) elek analizi değerlerinin eğrileri Şekil 4.1'deki gibidir. BPA malzemesi beton karışımlarında suya doymun yüzey kuru halde kullanılmıştır.



**Şekil 4.1.** Beton karışımlarında kullanılan BPA malzemesinin elek analizi (en büyük dane çapı 16 mm)

Hafif beton karışımlarında kullanılan BPA malzemesinin elek analizi değerlerinin, TS 802 (2016) standardında verilen beton karışımlarında kullanılabilir agregalar arasında kalması sağlanmıştır. Özellikle daha elverişli bir granülometri ile daha kompakt bir beton üretilebilmesi amacıyla agregaların elek analizi değerlerinin A ve B eğrileri arasında olması sağlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan BPA malzemesinin genel görünümü, SEM, EDS nokta ve PLM analizleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



BP= bazık pomza, P= plajoklaz.

Şekil 4.2. Bazık pomza agregası: a) genel görünüm, b) PLM analizi, c) SEM analizi d) EDS analizi

#### 4.1.8 Karışım suyu

Harç ve beton üretiminde su üç farklı amaç için kullanılmaktadır. Suyun birinci kullanım amacı çimento ile birleşerek hidrasyonun başlamasını sağlamaktır. İkinci kullanım amacı, beton ve harç üretiminde çimento ve agregalar tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze betonun istenilen kıvamda olmasını ve işlenebilmesini sağlamaktır. Üçüncü kullanım amacı ise, üretilmiş ve yerine yerleştirilmiş olan harcın veya betonun yüzeyinin ıslak tutularak, bünyesindeki suyun buharlaşmasını engelleyerek kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli suyun ortamda bulunmasını sağlamaktır. Bu çalışmada, kontrol karışımları hariç su, üçüncü kullanım amacı için alkali ile aktive edilmiş harçların ve



betonların yüzeyini ıslak tutmada kullanılmamıştır. Bunun amacı alkali ile aktive edilmiş harç ve hafif beton karışımlarında kullanılan alkalilerin bu karışımlarda bağlayıcı jel oluşumuna katılmadan suyun etkisiyle çözünüp harç ve beton bünyesini terk etme ihtimalidir. Bu nedenle etüvde belirli sıcaklıkta sıcak küre tabi tutulan harç ve hafif beton numuneleri deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan karışım ve bakım suyu Odunpazarı Belediyesi'ne ait şehir şebekesinden alınan içme suyudur.

## 4.2 Harç Karışım Oranları

Bu deneysel çalışmada, üretilecek hafif betonların bağlayıcı fazının elde edilebilmesi için çalışmada kullanılan YFC ve UK bağlayıcılarının tercih edilen kür koşullarında en uygun Na konsantrasyonu ile Ms modülünün (aktivatörlerin  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı) belirlenebilmesi amacıyla TS EN 196-1 (2016) standardı "dayanım tayini" bölümüne göre 40x40x160 mm boyutlarında harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen harç karışımlarını daha kolay ifade edebilmek için karışım kodlaması yapılmıştır. Bu kodlamada YFC malzemesi "A", UK malzemesi de "B" olarak kodlanmıştır. Harç karışımları, ağırlıkça %100 YFC içeren 100A, %75 YFC ve %25 UK içeren 75A25B, %50 YFC ve %50 UK içeren 50A50B, %25 YFC ve %75 UK içeren 25A75B ve %100 UK içeren 100B ve sadece Portland çimentosu ile üretilen K (kontrol) ile kodlanmış ve toplamda 6 farklı seri oluşturulmuştur. Alkali ile aktive edilmiş harç serilerinin her birinde bağlayıcı malzeme ağırlığının (YFC ve UK) %4'ü, %6'sı ve %8'i olmak üzere üç farklı Na konsantrasyonuna ve 1.25, 1 ve 0.75 olmak üzere üç farklı Ms modülüne göre 9 farklı harç karışımı üretilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı malzemelerin mekanik özelliklerinde Ms modülüne bağlı olarak meydana gelen değişimler dikkate alınarak 100A, 75A25B ve 100B serilerinde toplamda 10 harç karışımı daha üretilmiştir. YFC içeriği daha fazla olan harçların mekanik özelliklerinin Ms modülündeki düşüş ile artması sebebiyle 100A ve 75A25B serilerinde en iyi sonuçları veren Na konsantrasyonları için (100A serisi için %4 ve %6, 75A25B serisi için %6) Ms modülü düşürülerek 0.5 ve 0.25 ile 6 harç karışımı daha üretilmiştir. 100B serisi harçlarda Ms modülünün artması ile daha iyi mekanik özelliklere sahip harçlar elde edilmesi nedeniyle en iyi sonuçları veren %6 ve %8 Na konsantrasyonları için Ms modülü artırılarak 1.5 ve 2 Ms ile 4 harç karışımı daha üretilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık deneyleri için üretilen harçlarda karşılaştırma yapmak için %6 Na içeren 50A50B harçlarda da Ms modülü düşürülerek 0.5 ve 0.25 Ms ile 2 harç karışımı daha üretilmiştir.



Çizelge 4.5. Harç karışımları için malzeme miktar ve oranları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Na (%)	Ms	Çimento (g)	YFC (g)	UK (g)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (g)	NaOH (g)	Kum (g)	Su (g)
K	K			450					1350	225
100A	100A/4/1.25	4	1.25		450	0	106	19	1350	159
	100A/4/1	4	1		450	0	85	22	1350	172
	100A/4/0.75	4	0.75		450	0	64	24	1350	185
	100A/4/0.5	4	0.5		450	0	42	27	1350	198
	100A/4/0.25	4	0.25		450	0	21	29	1350	211
	100A/6/1.25	6	1.25		450	0	159	29	1350	126
	100A/6/1	6	1		450	0	127	32	1350	146
	100A/6/0.75	6	0.75		450	0	95	36	1350	165
	100A/6/0.5	6	0.5		450	0	64	40	1350	185
	100A/6/0.25	6	0.25		450	0	32	43	1350	205
	100A/8/1.25	8	1.25		450	0	212	38	1350	93
	100A/8/1	8	1		450	0	170	44	1350	119
100A/8/0.75	8	0.75		450	0	128	48	1350	146	
75A25B	75A25B/4/1.25	4	1.25		337.5	112.5	106	19	1350	159
	75A25B/4/1	4	1		337.5	112.5	85	22	1350	172
	75A25B/4/0.75	4	0.75		337.5	112.5	64	24	1350	185
	75A25B/6/1.25	6	1.25		337.5	112.5	159	29	1350	126
	75A25B/6/1	6	1		337.5	112.5	127	32	1350	146
	75A25B/6/0.75	6	0.75		337.5	112.5	95	36	1350	165
	75A25B/6/0.5	6	0.5		337.5	112.5	64	40	1350	185
	75A25B/6/0.25	6	0.25		337.5	112.5	32	43	1350	205
	75A25B/8/1.25	8	1.25		337.5	112.5	212	38	1350	93
	75A25B/8/1	8	1		337.5	112.5	170	44	1350	119
75A25B/8/0.75	8	0.75		337.5	112.5	128	48	1350	146	
50A50B	50A50B/4/1.25	4	1.25		225	225	106	19	1350	159
	50A50B/4/1	4	1		225	225	85	22	1350	172
	50A50B/4/0.75	4	0.75		225	225	64	24	1350	185
	50A50B/6/1.25	6	1.25		225	225	159	29	1350	126
	50A50B/6/1	6	1		225	225	127	32	1350	146
	50A50B/6/0.75	6	0.75		225	225	95	36	1350	165
	50A50B/6/0.5	6	0.5		225	225	64	40	1350	185
	50A50B/6/0.25	6	0.25		225	225	32	43	1350	205
	50A50B/8/1.25	8	1.25		225	225	212	38	1350	93
	50A50B/8/1	8	1		225	225	170	44	1350	119
50A50B/8/0.75	8	0.75		225	225	128	48	1350	146	
25A75B	25A75B/4/1.25	4	1.25		112.5	337.5	106	19	1350	159
	25A75B/4/1	4	1		112.5	337.5	85	22	1350	172
	25A75B/4/0.75	4	0.75		112.5	337.5	64	24	1350	185
	25A75B/6/1.25	6	1.25		112.5	337.5	159	29	1350	126
	25A75B/6/1	6	1		112.5	337.5	127	32	1350	146
	25A75B/6/0.75	6	0.75		112.5	337.5	95	36	1350	165
	25A75B/8/1.25	8	1.25		112.5	337.5	212	38	1350	93
	25A75B/8/1	8	1		112.5	337.5	170	44	1350	119
	25A75B/8/0.75	8	0.75		112.5	337.5	128	48	1350	146
100B	100B/4/1.25	4	1.25		0	450	106	19	1350	159
	100B/4/1	4	1		0	450	85	22	1350	172
	100B/4/0.75	4	0.75		0	450	64	24	1350	185
	100B/6/2	6	2		0	450	254	18	1350	67
	100B/6/1.5	6	1.5		0	450	190	25	1350	106
	100B/6/1.25	6	1.25		0	450	159	29	1350	126
	100B/6/1	6	1		0	450	127	32	1350	146
	100B/6/0.75	6	0.75		0	450	95	36	1350	165
	100B/8/2	8	2		0	450	338	24	1350	14
	100B/8/1.5	8	1.5		0	450	254	34	1350	67
	100B/8/1.25	8	1.25		0	450	212	38	1350	93
	100B/8/1	8	1		0	450	170	44	1350	119
100B/8/0.75	8	0.75		0	450	128	48	1350	146	

Harç karışımlarında 3 adet 40x40x160 mm boyutlarındaki harç kalıpları için 450 g bağlayıcı malzeme, 225 g su, 1350 g standart kum kullanılmış ve Na konsantrasyonu ile Ms modülüne göre sodyum silikat ve NaOH miktarları belirlenmiştir. Sıvı halde kullanılan sodyum silikatın muhtevastındaki su miktarı karışımda kullanılacak olan 225 g su içeriğine dâhil edilmiş ve buna göre de sabit su içeriğinin sağlanabilmesi için karışım suyundan bu miktar çıkarılmıştır. Toplamda 58 farklı harç karışımı elde edilmiş ve bu karışımlarda kullanılan malzeme miktarları 3 adet 40x40x160 mm boyutlarındaki harç kalıbı hacmi için Çizelge 4.5’de verilmiştir. Üretilen harç karışımlarını daha kolay ifade edilebilmek amacıyla sırasıyla bağlayıcı malzeme oranı, Na konsantrasyonu ve Ms modülü değerlerine göre karışımlar kodlanmıştır. Örneğin; 75A25B/8/1.25 bağlayıcı malzeme olarak ağırlıkça %75 YFC ve %25 UK ikili bağlayıcı malzeme karışımı içeren, bağlayıcı malzeme ağırlığının %8’i kadar Na konsantrasyonuna sahip ve karışımda kullanılan alkalilerin Ms modülünün 1.25 olduğu karışımdır.

#### **4.3 Harç Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları**

Alkaliler ile aktive edilmiş harç karışımları Çizelge 4.5’de verilen karışım miktar ve oranlarına göre her biri 3 adet 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma kalıplara yerleştirilmek üzere üretilmiştir. Çizelge 4.5’deki her karışım 3 kere üretilmiş ve her bir karışım için 9 adet prizma numune elde edilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalacak harçlardan 9 adet numune daha üretilmiştir. Harç karışımlarının üretimi TS EN 196-1 (2016) standardına uygun olarak Fotoğraf 4.4’de gösterilen Hobart mikserinde gerçekleştirilmiştir. Hobart mikseri 140 ve 285 devir/dakika olmak üzere iki farklı karıştırma hızına sahiptir. 140 devir/dakika yavaş, 285 devir/dakika da hızlı ayarda karıştırmadır. Hobart mikseri karıştırma kabına öncelikle alkalilerle aktive edilecek olan bağlayıcı malzeme veya maddeler yerleştirilmiş, daha sonra sıvı sodyum silikat ve karışım suyunda eritilip soğumaya bırakılan NaOH karışım suyuyla birlikte çözelti halinde eklenmiştir. Karıştırma kabı mikserde yerleştirildikten sonra Hobart mikseri TS EN 196-1 (2016) standardına göre ilk olarak 30 sn yavaş ayarda çalıştırılmıştır. İlk 30 saniyelik yavaş karıştırmadan sonra, standart kum karışıma yavaşça ilave edilmeye başlanmış ve bu süreçte 30 saniye daha ikinci yavaş karıştırma uygulanmıştır. İlk 60 saniyelik yavaş karıştırmadan sonra karışımlar 30 saniye de hızlı ayarda karıştırılmıştır. Daha sonra 15 saniye kadar dinlenen karışımlar tekrar 60 saniye hızlı ayarda karıştırılmış ve harç karışımı üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Sırasıyla 100B ve 100A harç serilerinde kullanılan malzemelerin harç üretimi öncesindeki görünüşleri ile bu harçların üretim tamamlandıktan sonra Hobart mikseri karıştırma kabındaki görünüşleri Fotoğraf 4.5’de sunulmuştur.



**Fotoğraf 4.4** Hobart mikseri



**Fotoğraf 4.5** Harçların üretimi

Karıştırma kabından mala yardımıyla alınan harç karışımları iki veya üç tabaka halinde prizma numune kalıplarına doldurulmuş, üzerleri düzeltilmiş ve dakikada 60 kere düşme hareketi yapan düşme tablasıyla da sıkıştırılmıştır. Sırasıyla bağlayıcı malzeme, Na konsantrasyonu ve Ms modülüne göre kodlama yapılan numuneler (örneğin 100A/6/1.25; bağlayıcı malzeme olarak %100 YFC içeren, YFC ağırlığının %6’sı kadar Na muhteva

eden ve alkalilerin Ms modülünün 1.25 olduğu karışımı ifade eder) 24 saat boyunca laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Daha sonra kalıplarından çıkarılan numuneler 80 °C de 48 saat boyunca etüvde kür edilmiş ve bu sürenin sonunda etüvden çıkarılmış deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Boş üçlü prizma kalıbı ile yerine yerleştirilmiş olan 100A ve 100B harçların görünüşleri Fotoğraf 4.6’da verilmiştir. Portland çimentosu ile üretilen kontrol harçları (K) ise üretimden 1 gün sonra kalıplarından çıkarılmış ve deney gününe kadar standart kür koşullarında kür havuzunda  $25 \pm 2$  °C’de bekletilmiştir.



**Fotoğraf 4.6** Harç karışımlarının kalıplarına yerleştirilmiş hali

#### 4.4 Harç Deneyleri

##### 4.4.1 Sertleşmiş birim ağırlık tayini

Birim ağırlık, malzemenin içerisinde bulunan boşluklar da dâhil ağırlığının, malzemenin hacmine bölünmesiyle belirlenir. Alkali ile aktive edilmiş harçların ve kontrol harçlarının birim ağırlıkları üretimden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılan numunelerin ağırlıkları tartılarak tayin edilmiştir. Kalıplardan çıkarılan harç numunelerinin ağırlıkları Fotoğraf 4.7’deki gibi tartılmıştır. Tartılan harçların ağırlıkları hacimlerine bölünerek sertleşmiş birim ağırlıkları belirlenmiş, her karışım için üç numunenin birim ağırlıklarının ortalaması alınarak sertleşmiş harç karışımlarının birim ağırlıkları tayin edilmiştir.



**Fotoğraf 4.7** Alkali ile aktive edilmiş harçların ağırlıklarının bulunması

#### 4.4.2 Ultrases geçiş hızı

Ultrases geçiş hızı ( $U_{pv}$ ) deney metoduyla harcın veya betonun dayanım değerleri tam olarak belirlenmemektedir. Ancak bir harç veya beton numunenin bir tarafından diğer bir tarafına geçen ses üstü dalganın geçiş süresi, numunelerin içerisinde bulunan boşluklar ve numunelerin yoğunluğu ile ilişkilidir. Daha boşluksuz ve dolu bir harç veya betondan ses üstü dalganın geçiş süresi daha kısadır. Ses üstü dalganın geçiş süresinin daha kısa olması harcın veya betonun genellikle daha kaliteli olduğunu, dayanımının daha yüksek ve dayanıklılığının daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, ultrases geçiş süresi ölçümleri, dijital ultrases geçiş hızı ölçme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş süresi belirlenmeden önce numunelerin ölçüm yapılacak yüzeyleri temizlenmiştir. Ayrıca, okumaların daha iyi yapılabilmesi için cihazın başlıklarına bir jel sürülmüştür. Daha sonra bu cihazın alıcı ve verici başlıkları her bir numunenin karşılıklı yüzeylerine tutulmuş ve numuneden ultrases geçiş süreleri okunmuştur. Her bir numunede en az iki okuma yapılmıştır. Daha sonra 3 numuneden okunan değerler ile ultrases geçiş süreleri belirlenmiştir.  $U_{pv}$  ölçümleri ASTM C 597 (2009) standardına uygun olarak yapılmıştır.  $U_{pv}$  deneyinin yapılışı Fotoğraf 4.8'de verilmiştir. Harç numunelerinin 7, 28 ve 56 günlük ultrases geçiş süreleri eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) deneylerinden önce okunmuştur. Okunan ultrases geçiş süreleri sesin numunenin bir tarafından diğer tarafına geçmesi için geçen zamanın milyonda biri olarak alınır. Diğer bir deyişle, ultrases geçiş süresi mikrosaniye ( $\mu s$ ) cinsinden ifade edilir.  $U_{pv}$  değeri, ses üstü dalgaların numunenin bir tarafından diğer tarafına geçiş süresine bağlı olarak Denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$U_{pv} = \frac{S}{t} \times 10 \quad (4.1)$$

Burada,  $U_{pv}$ ; ultrases geçiş hızını (km/sn), S; harcın veya beton numunesinin ses dalgası gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki uzaklığı (cm) ve t; ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu numune yüzeyinden, dalganın alındığı yüzeye kadar geçen zamanı ( $\mu$ s) ifade etmektedir.



**Fotoğraf 4.8** Harçların ultrases geçiş sürelerinin belirlenmesi

#### 4.4.2 Eğilme dayanımı

Harç numunelerinin eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) değerleri TS EN 196-1 (2016) standardına göre belirlenmiştir. Harçların  $f_{fs}$  değerleri üç prizma numunenin  $f_{fs}$  değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Harç numunelerin  $f_{fs}$  değerleri, numunelerin döküm yönü olmayan yan yüzeylerine tek noktadan yükleme yapılması suretiyle tayin edilmiştir. Tek noktadan yükleme yapılacak olan 40x40x100 mm boyutlarındaki prizma numuneler yan yüzeylerinden çimento presinin mesnet silindirlerinin üzerine yerleştirilmiştir. Mesnet silindirlerinin açıklığı 10 cm olmakla birlikte yük numunenin orta noktasından mesnet silindirlerinin eksenlerine dik olacak şekilde uygulanmıştır. Harç numunelerin  $f_{fs}$  değerleri ise numunenin kırılmasına neden olan yükün numune kesitinde meydana getirdiği momentin kesit mukavemet momentine bölünmesi ile tayin edilmiştir. Çimento presinde yerine yerleştirilmiş ve tek noktadan uygulanan eğilme kuvvetinin etkisiyle kırılmış numunelerin görünüşleri Fotoğraf 4.9'da gösterilmiştir.





**Fotoğraf 4.9** Harçların eğilme dayanımlarının belirlenmesi

#### 4.4.3 Basınç dayanımı

Harçların basınç dayanımı ( $f_c$ ) deneyleri  $f_{fs}$  değerlerinin belirlenmesinin ardından ikiye bölünen yarım prizma halindeki numuneler üzerinde TS EN 196-1 (2016) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Harçların  $f_c$  değerleri üç prizma numunesinin ikiye bölünen altı parçasının  $f_c$  değerlerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Yükleme öncesinde yarım prizma numunelerin döküm yönü olmayan alt ve üst yüzeyleri, çimento presinin 40x40 mm ölçülerindeki plakaları arasına Fotoğraf 4.10'daki gibi yerleştirilmiştir. Harç numunelerinin basınç dayanımı ( $f_c$ ) değerleri, numunelerin kırılmasına neden olan kuvvetin  $1600 \text{ mm}^2$  olan yükleme yapılan kesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir.



**Fotoğraf 4.10** Harçların basınç dayanımlarının belirlenmesi

#### 4.4.4 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi

Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi kontrol harçları ile birlikte 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçlardan %6 Na içeren harçlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneyin amacı, YFC malzemesi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılığı üzerine UK malzemesinin etkisini araştırmak ve bu harçların yüksek sıcaklığa dayanıklılığını Portland çimentosuyla üretilen kontrol harçları ile kıyaslamaktır. Bu amaçla, harç numunelerinin bünyelerinde bulunan suyun yüksek sıcaklık etkisiyle buhar basıncına neden olup numunelere zarar vermemesi için numuneler üretimden 28 gün sonra etüvde 24 saat süreyle 105 °C’de bekletilmiştir. Daha sonra, yüksek sıcaklık deneyi öncesinde numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Harç numuneleri TS EN 1363-1 (2013) standardına uygun 6 °C/dk. ısınma ısısına sahip yüksek sıcaklık fırınında 400 °C, 600 °C ve 800 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletilmiştir. Her bir karışım için 3 adet numune 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda ayrı ayrı bekletilerek her bir karışım için toplamda 9 adet numune yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. 3 saat boyunca yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerin yavaşça soğuması için yüksek sıcaklık fırını 1 gün soğumaya bırakılmıştır. 1 gün boyunca yavaşça soğuyan numunelerin ağırlıkları tartılmış ve birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra numunelerin  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri deneysel olarak belirlenmiştir. Harç numunelerinin birim ağırlıkları ile  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler irdelenmiş ve birbirleriyle ayrı ayrı kıyaslanmıştır.

#### 4.5 Hafif Beton Karışım Oranları

Yapılan deneysel çalışma kapsamında üretilen hafif betonların karışımlarında kullanılan malzemelerin miktarları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Hafif beton karışımları harç karışımları ile benzer şekilde 1 kontrol serisi ve 5 alkali ile aktive edilmiş beton serisi olmak üzere 6 farklı seri şeklinde üretilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş hafif beton serileri, harç serilerindeki en iyi mekanik özelliklere sahip olan ikişer harç karışımının bağlayıcı fazının (harç karışımlarının standart kum hariç kısmı) hafif betonların bağlayıcı fazı olarak seçilmesi suretiyle oluşturulmuştur. Böylece, kontrol betonu ile birlikte toplamda 11 karışım üretilmiştir. Üretilen 11 hafif beton karışımı harç karışımlarıyla aynı şekilde kodlanmıştır. Kodlamada, YFC malzemesi A harfiyle, UK malzemesi de B harfiyle gösterilmiştir. Örneğin; Kontrol betonları K ile ifade edilirken, 100B/8/1.25 bağlayıcı



malzeme olarak ağırlıkça %100 UK içeren, UK ağırlığının %8'i kadar Na muhteva eden ve alkalilerin Ms modülünün 1.25 olduğu betonlardır. Ayrıca, beton serilerini betonlardaki bağlayıcı malzeme içeriğine göre ifade etmek için benzer kısaltmalar kullanılmıştır. Örneğin; 25A75B bağlayıcı malzeme olarak ağırlıkça %25 YFC ve %75 UK içeren betonlar iken, 100B bağlayıcı malzeme olarak %100 UK içeren betonlardır. Hafif beton üretiminde kullanılan malzemelerin karışım miktarları TS 2511 (2017) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Tüm beton karışımına giren malzemeler ağırlıkça kullanılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harç serilerinden seçilen 10 karışım ile aynı su:bağlayıcı oranındaki bağlayıcı pastanın hafif betonda da elde edilebilmesi için öncelikle harç karışımlarında kullanılan CEN standart kumunun ağırlıkça su emme yüzdesi TS EN 1097-6 (2013) standardına göre % 0.67 olarak bulunmuştur. Standart kumun emdiği su miktarı harç karışımlarında kullanılan 225 g sudan çıkarılmış ve bağlayıcı pasta eldesi için net su miktarı, 450 g bağlayıcı malzeme için 216 g olarak bulunmuştur. Böylece harç karışımlarında 0.48 su:bağlayıcı oranı ile yapılan üretim ile elde edilen bağlayıcı pastaların aynısının hafif betonlarda da elde edilebilmesi için bu oran beton karışımlarında da uygulanmıştır. Belirlenen su:bağlayıcı oranı TS 2511 (2017) standardında çeşitli çevre etki sınıflarına göre izin verilen en büyük su:çimento oranı şartını karşılamaktadır. Bu deneysel çalışmada, üretilecek hafif betonlar için bağlayıcı malzeme dozajı 500 kg/m<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir. TS 2511 (2017) standardına göre hapsolmuş hava miktarı belirlenmiş, daha sonra gereken agrega hacmi hesaplanmıştır. Son olarak ise, beton karışımında kullanılacak malzemelerin hacimleri özgül ağırlıklarına bölünerek malzemelerin ağırlıkları belirlenmiştir.

**Çizelge 4.6** Bir metreküp beton karışımı için malzeme miktar ve oranları

Seri Kodu	Karışım Kodu	Na (%)	Ms	Çimento (kg)	YFC (kg)	UK (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	BPA (kg)	Su (kg)
K	K			500					1059.43	240
100A	100A/4/0.5	4	0.5		500	0	47	29	1002.23	198
	100A/6/0.5	6	0.5		500	0	70	44	986.34	185
75A25B	75A25B/6/1	6	1.0		375	125	141	36	966.65	146
	75A25B/6/0.75	6	0.75		375	125	106	40	969.07	165
50A50B	50A50B/6/1.25	6	1.25		250	250	176	32	950.72	126
	50A50B/6/1	6	1.0		250	250	141	36	953.13	146
25A75B	25A75B/6/1.25	6	1.25		125	375	176	32	937.19	126
	25A75B/6/1	6	1.0		125	375	141	36	939.60	146
100B	100B/6/1.5	6	1.5		0	500	211	28	921.25	106
	100B/8/1.25	8	1.25		0	500	235	43	902.18	93

YFC: Yüksek fırın cürufu, UK: Uçucu kül, BPA: Bazik Pomza Agregası

#### 4.6 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama ve Numune Boyutları

Beton üretimi 30 dm<sup>3</sup> kapasiteye sahip yatayda döner tekneli ve eğilebilen karıştırıcıda yapılmıştır. Hafif beton üretimine öncelikle beton karışımına girecek BPA malzemesinin doygun yüzey kuru hale getirilmesi ile başlanılmıştır. Bunun nedeni hafif agregaların yüksek su emme kapasiteleri nedeniyle beton karışımında neden olabileceği kıvam ve işlenebilirlik kaybının önlenmesidir. Hafif beton karışımına dâhil olacak malzemelerin hangi sıra veya miktar ile karıştırıcıya döküleceğine dair standartlarda bir kural bulunmamaktadır. Ancak, özellikle hafif beton karışımlarında malzemelerin karışıma eklenme sırası ve miktarı, betonların taze ve sertleşmiş özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada üretilecek hafif betonlarda kıvam ve işlenebilirlik kaybını önlemek ve homojen bir üretim sağlanabilmesi için deneme üretimleri yapılmıştır. Deneme üretimlerinden elde edilen tecrübelerle hafif beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle doygun yüzey kuru hale getirilen BPA malzemesi karıştırıcıya dökülmüş ve 1 dakika karıştırılmıştır. Bundan sonra da içinde katı NaOH çözündürülmüş karışım suyunun yarısı BPA malzemesinin üzerinde dökülmüştür. Daha sonra, ıslak haldeki agregaların üzerine bağlayıcı malzemenin tamamı karıştırıcıya boşaltılmış ve bu malzemeler 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Kısa süre dinlendirilen karışıma sodyum silikat ve karışım suyunun diğer yarısı ilave edilerek 2 dakika daha karışım yapılarak alkali ile aktive edilmiş hafif beton üretimi tamamlanmıştır. Kontrol betonları ise doygun yüzey kuru haldeki BPA malzemesinin karıştırıcıya dökülmesi ve 1 dakika karıştırılması, ardından karışım suyunun yarısının BPA malzemesi üzerinde dökülmesi, sonra çimentonun karışıma eklenmesi ve son olarak da karışım suyunun diğer yarısının ilave edilmesiyle üretilmiştir. Daha sonra, üretilmiş hafif betonlar yağlanmış beton kalıplara yerleştirilmiştir. Üretilen betonların  $f_c$ , yarmada çekme dayanımı ( $f_{st}$ ) ve dayanıklılık deneyleri için 10x10x10 cm boyutlarında küp numuneler ve  $f_{fs}$  deneyleri için 10x10x40 cm boyutlarında prizmatik numuneler kullanılmıştır. Üretilen betonların kalıplara iyi yerleşebilmesi için yerleştirme işlemi 3 aşamada yapılmış ve her aşamada numunelere titreşim masası ile sıkıştırma uygulanmıştır. Alkali ile aktive edilmiş harç numunelerinde olduğu gibi 24 saat sonra kalıplardan çıkartılan alkali ile aktive edilmiş beton numuneleri, 48 saat boyunca 80 °C de etüvde sıcak küre maruz bırakıldıktan sonra, deney gününe kadar laboratuvar ortamında yaklaşık 25 °C'de bekletilmiştir. Kontrol betonları ise kontrol harçlarıyla aynı şekilde standart kür koşullarında muhafaza edilmiştir. Üretilen beton numuneler üzerinde dayanım, dayanıklılık ve mikro yapı

deneylei gerçekleştirilmiştir. Kalıplarından ıkarılan 100B/8/1.25 kodlu betonların görünümleri Fotoğraf 4.11'deki gibidir.



**Fotoğraf 4.11** Sertleşmiş beton numunelerin görünümü

## 4.7 Beton Deneylei

### 4.7.1 Çökme (slump) deneylei

Deneysel çalışmada, çökme deneylei TS EN 12350-2 (2010) standardına uygun olarak üretilen taze betonlar üzerinde yapılmıştır. Çökme deneylei için kullanılan kesik huninin yani Abrams hunisinin yüksekliği 30 cm, alt çapı 20 cm ve st çapı 10 cm dir. Deneylei başlamadan önce Abrams hunisinin i yüzeyi bir ıslak bez vasıtasıyla ıslatılmıştır. Daha sonra Abrams hunisi su emmeyen bir yüzeye yerleştirilmiş ve huni üç eşit tabaka halinde taze betonla doldurulmuştur. Huniye yerleştirilen taze betonun her bir tabakası, 60 cm uzunluğa ve 16 mm çapa sahip bir deney çubuğu ile art arda 25 kez şişlenmiştir. Daha sonra huninin st tarafında kalan boşluk da doldurularak huninin st yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiştir. Düzeltme işleminden hemen sonra, huninin kulplarından tutularak huni sarsılmadan dikkatli bir şekilde yukarı kaldırılarak çıkarılmıştır. Huninin çıkarılmasıyla taze betonun kendi ağırlığı ile çöktüğü gözlenmiştir. Çıkarılan huni çökme yapan betonun hemen yanına ters çevrilerek konulmuş ve huninin üzerine şişleme çubuğu betonun üzerinden geçecek şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerde devrilme olmaksızın,

huni çıkartıldıktan sonra betonun çöktüğü miktar, hafif beton karışımının çökme değeri olarak belirlenmiştir.

#### 4.7.2 Taze betonun birim ağırlığı

Taze betonun birim ağırlığı belirli bir kabın içine sıkıştırılarak yerleştirilmiş betonun birim hacmine karşılık gelen ağırlığıdır. ASTM C138/C138M-17a (2017) ve TS EN 12350-6 (2010) standartlarına göre taze betonun birim ağırlığı belirlenmektedir. Betonun birim hacim ağırlığı ifade edilirken genellikle,  $\text{kg/m}^3$  veya  $\text{t/m}^3$  birimleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada üretilen betonların taze birim ağırlıkları Denklem 4.2 ile hesaplanmıştır.

$$\Delta t = \frac{P_t}{V_t} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’de,  $\Delta t$ ; taze betonun birim ağırlığını ( $\text{kg/m}^3$ ),  $P_t$ ; taze betonun ağırlığını (kg) ve  $V_t$ ; taze betonun hacmini ( $\text{m}^3$ ) ifade etmektedir.

Bu çalışmada üretilen betonların taze birim ağırlıkları belirlenirken 10x10x10 cm küp numune kalıpları kullanılmıştır. Kullanılacak küp kalıpların ağırlıkları deney öncesinde tartılmıştır. Beton karışımları küp kalıplara 3 aşamada sıkıştırılarak yerleştirilmiştir. Yerleştirmenin her aşamasında titreşim masası ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Taze betonla doldurulan kalıpların üst yüzeyleri mala yardımıyla tesviyelenmiş ve kalıpların dışına taşan beton temizlenmiştir. Daha sonra, taze betonla doldurulan küp numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Taze beton doldurulan kalıpların ağırlıkları tartıldıktan sonra, tartılan ağırlıktan kalıbın boş ağırlığı çıkartılarak betonun net ağırlığı bulunmuştur ( $P_t$ ). Son olarak, betonun net ağırlığı, 10x10x10 cm küp numunenin hacmine ( $V_t$ ) bölünerek taze betonun birim hacim ağırlığı belirlenmiştir.

#### 4.7.3 Sertleşmiş birim ağırlık ve su emme

Sertleşmiş betonun etüv kurusu ve suya doymun birim ağırlığı TS EN 12390-7 (2010) standardına uygun şekilde belirlenmiştir. Üretilmiş olan betonların sertleşmiş birim ağırlık değerleri 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde belirlenmiştir.

Sertleşmiş haldeki betonların etüv kurusu ve suya doymuş yüzey kuru haldeki birim ağırlıkları Denklem 4.3 ve 4.4 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta k = \frac{P_k}{V_s} \quad (4.3)$$

$$\Delta d = \frac{P_d}{V_s} \quad (4.4)$$

Denklem 4.3 ve 4.4'teki,  $\Delta k$ ; etüv kurusu haldeki sertleşmiş betonun birim ağırlığını ( $\text{kg/m}^3$ ),  $P_k$ ; etüv kurusu haldeki sertleşmiş betonun ağırlığını (kg),  $\Delta d$ ; suya doymuş yüzey kuru haldeki sertleşmiş betonun birim ağırlığını ( $\text{kg/m}^3$ ),  $P_d$ ; suya doymuş yüzey kuru haldeki sertleşmiş betonun ağırlığını (kg) ve  $V_s$ ; sertleşmiş betonun hacmini ( $\text{m}^3$ ) ifade etmektedir.

Betonların etüv kurusu haldeki birim ağırlıklarının belirlenebilmesi için betonlar hava dolaşımı etüvde  $105\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 24 saat bekletilmiş ve daha sonra betonların ağırlıkları tartılmıştır ( $P_k$ ). Beton numunelerin suya doymuş birim ağırlıklarının belirlenebilmesi için öncelikle kür havuzuna atılmış, değişmez ağırlığa gelinceye kadar havuzda bekletilmiş ve daha sonra da havuzdan çıkarılmıştır. Havuzdan alınan numuneler suya doymuş kuru yüzey hale getirildikten sonra ağırlıkları tartılarak sertleşmiş haldeki suya doymuş ağırlıkları belirlenmiştir ( $P_d$ ). Kuru ve suya doymuş haldeki beton numunelerin her birinin ağırlıkları ayrı ayrı tartılmış ve bir karışıma karşılık gelen 3 numunenin ortalama ağırlık değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ağırlık değerlerinin numune hacmine bölünmesiyle, her bir karışımın suya doymuş ve etüv kurusu sertleşmiş birim ağırlık değerleri ayrı ayrı belirlenmiştir. Etüv kurusu ve suya doymuş yüzey kuru haldeki ağırlıkları belirlenen beton numunelerin ağırlıkça su emme yüzdeleri Denklem 4.5 ile belirlenmiştir.

$$S_e = \left( \frac{P_d - P_k}{P_k} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Denklem 4.5'teki,  $S_e$ ; betonun ağırlıkça su emme oranını (%),  $P_d$ ; suya doymuş yüzey kuru haldeki sertleşmiş betonun ağırlığını (kg),  $P_k$ ; etüv kurusu haldeki sertleşmiş betonun ağırlığını (kg) ifade etmektedir.

#### 4.7.4 Kılcal su emme

Bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlar ile kontrol betonları üzerinde ASTM C1585-13 (2013) standardına uygun şekilde kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu deney için 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmış, numuneler deneyden önce etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir. Daha sonra, betonların 4 yüzü su emmeyen bantla kaplanmıştır. Kaplama işleminden sonra bir kap içerisine iki mesnet yerleştirilmiş ve beton numunelerin kaplı olmayan bir yüzü bu mesnetlerin üzerine gelecek şekilde konulmuştur. Bu işlemden sonra kap, betonun kaplı olmayan yüzeyi 5 mm kadar suya batacak şekilde suyla doldurulmuştur. Tek yüzeyi suyla temas halinde olan beton numuneler tarafından 1., 5., 10., 20. ve 30. dakikada; 1., 2., 3., 4., 5. ve 6. saatte; 1., 2., 3., 4., 5., 6., 7. ve 8. günde kılcal yolla emilen su miktarı belirlenmiştir. Numuneler tarafından kılcal yolla emilen su miktarı numunelerin suyla temas ettiği yüzeyin alanına (10x10 cm) bölünerek belirlenen sürelerde numuneler tarafından emilen suyun numunenin hangi yüksekliğine kadar çıktığı teorik olarak Denklem 4.6'ya göre belirlenmiştir. Ayrıca, ASTM C1585-13 (2013) standardına göre numunelere ait birincil su emme katsayıları 1 saate kadar kılcal yolla emdikleri su miktarlarına göre, ikincil su emme katsayıları ise 1 ile 8 gün arasında emdikleri su miktarı dikkate alınarak belirlenmiştir. Birincil ve ikincil su emme katsayıları; betonların kılcal yolla emdikleri suyun seviyesinin (I), zamanın kareköküne ( $sn^{1/2}$ ) bağlı değişimini gösteren grafikteki doğrusal eğilim çizgilerinin eğimleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

$$I = \frac{m_t}{a \times d_{su}} \quad (4.6)$$

Denklem 4.6'daki, I; kılcal su emmeyi (mm),  $m_t$ ; numunenin ağırlığında t zamanda meydana gelen değişimi (g), a; numunenin suyla temas eden yüzey alanını ( $mm^2$ ),  $d_{su}$ ; suyun yoğunluğunu ( $g/mm^3$ ) ifade etmektedir.

#### 4.7.5 Ultrases geçiş hızı

Alkali ile aktive edilmiş hafif betonların ultrases geçiş süreleri harç numunelerinde olduğu gibi her bir numuneden en az iki okuma alınmak suretiyle 3 numuneden okunan

değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.  $U_{pv}$  ölçümleri harç numunelerinde olduğu gibi ASTM C 597 (2009) standardına göre yapılmıştır. Ultrases geçiş süresinin belirlenmesinde 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Bu numuneler üzerinde ultrases geçiş süresi, sertleşmiş birim ağırlıkları tayin edildikten hemen sonra belirlenmiştir. Hafif beton numunelerinin  $U_{pv}$  değerleri numune boyutundan geçiş süresine bağlı olarak Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır.

#### 4.7.6 Eğilme dayanımı

Deneysel çalışmada hafif betonların eğilme dayanımı ( $f_{fs}$ ) değerleri 10x10x40 cm boyutlarında prizma numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada  $f_{fs}$  deneyleri, TS EN 12390-5 (2010) standardına göre yapılmıştır. Hafif beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen  $f_{fs}$  deneyleri tek noktadan yükleme deneyine göre belirlenmiştir. Her bir karışıma ait  $f_{fs}$  deneylerinde deneye tabi tutulan 3 numunenin ortalama yük değerleri dikkate alınmıştır. Numunelere ait  $f_{fs}$  değerleri kırılma yüküne bağlı olarak Denklem 4.7 kullanılarak belirlenmiştir. Eğilme deneyinin yapılışı Fotoğraf 4.12'de verilmiştir.



**Fotoğraf 4.12** Betonların eğilme dayanımlarının belirlenmesi

$$f_{fs} = \frac{3NL}{2bd^2} \quad (4.7)$$

Bu formülde,  $f_{fs}$ ; eğilme dayanımını (MPa), N; kırılmaya neden olan yükü (N), L; numunenin uzunluğunu (mm), b; numunenin enini (mm) ve d; numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

#### 4.7.7 Basınç dayanımı

Deneysel çalışmada alkali ile aktive edilmiş hafif betonların  $f_c$  değerleri TS EN 12390-3 (2010) standardında uygun olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada  $f_c$  deneyleri 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hafif betonların sertleşmiş ağırlıkları ve ultrases geçiş süreleri belirlendikten sonra, Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan 3000 kN yük kapasitesine sahip pres kullanılarak istenilen günlerdeki  $f_c$  değerleri belirlenmiştir.

#### 4.7.8 Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımı ( $f_{sts}$ ) deneyleri 10x10x10 cm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde TS EN 12390-6 (2010) standardında belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Laboratuvar ortamında bekletilen hafif beton numunelerinin  $f_{sts}$  deneyleri gerçekleştirilmeden önce numunelerin suya doymun kuru yüzey durumuna gelmeleri sağlanmıştır. Beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen  $f_{sts}$  deneyleri, numunelerin alt ve üst yüzeylerine çelik çıtalar yerleştirilerek, bu deney için yapılmış aparata yerleştirildikten sonra 3000 kN yük kapasitesine sahip pres ile deneye tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde kırılma yükleri uygulanan numuneler ortadan yarılarak iki ayrı parçaya ayrılmaktadır. Numunelerde, numune uzunluğu boyunca dar bir alana yerleştirilen çelik çıtalar ile basınç yükü uygulanarak  $f_{sts}$  değerleri belirlenir. Yükleme doğrultusuna dik doğrultuda oluşan çekme kuvvetleri etkisiyle oluşan çekme gerilmeleri numunenin kırılmasına yol açar. Numunelere ait  $f_{sts}$  değerleri kırılma yükü değeri kullanılarak Denklem 4.8 ile belirlenmiştir. Ayrıca, yarmada çekme deneyinin yapılışı Fotoğraf 4.13'de verilmiştir.



$$f_{sts} = \frac{2N}{\pi a^2} \quad (4.8)$$

Burada,  $f_{sts}$ ; yarmada çekme dayanımını (MPa), N; kırılmaya neden olan yükü (N) ve a; küp numunenin uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.



**Fotoğraf 4.13** Betonların yarmada çekme dayanımlarının belirlenmesi

#### 4.7.9 Asit etkisine dayanıklılık deneyi

Alkali ile aktive edilmiş hafif betonlarda asit etkisinin neden olduğu etkiler, betonların ağırlıklarında ve  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler irdelenerek belirlenmiştir. Bu amaçla, 10x10x10 cm küp beton numuneleri üretimden 28 gün sonra doygun yüzey kuru hale getirilmiş ve daha sonra asit etkisine maruz bırakılmadan önceki ağırlıkları bulunmuştur. Daha sonra kontrol betonu ile birlikte 11 farklı karışımda üretilen hafif betonların her birinden 3 numune 28 gün ve 3 numune de 56 gün boyunca %10; 3 numune 28 gün ve 3 numune de 56 gün boyunca %20 olmak üzere 2 farklı derişimde hazırlanan HCl çözeltilerine ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Asit etkisine maruz bırakılan numunelerin ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra, betonların asit etkisinde meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 4.9 ile hesaplanmıştır. Benzer şekilde, asit etkisine maruz bırakılan betonların  $f_c$  değerleri belirlenmiş ve bu değerler betonların deney öncesi  $f_c$  değerleri ile kıyaslanmıştır. Bununla birlikte, asit etkisinin alkali ile aktive edilmiş hafif betonlarda

meydana getirdiği değişimler hem birbirleriyle hem de kontrol betonuyla kıyaslanmıştır. Asit etkisine maruz bırakılan betonların görünümleri Fotoğraf 4.14’de sunulmuştur.



**Fotoğraf 4.14** Asit etkisinde kalan betonların görünümleri

#### 4.7.10 Sülfat etkisine dayanıklılık deneyi

Bu çalışmada, alkali ile aktive edilmiş hafif betonların ağrılıklarında ve  $f_c$  değerlerinde sülfat etkisi ile meydana gelen değişimler irdelenmiş, birbirleriyle ve geleneksel hafif betonla (kontrol betonu) kıyaslanmıştır. Bu amaçla, 10x10x10 cm kp beton numuneleri üretimden 28 gün sonra doğgun yüzey kuru hale getirilmiş ve daha sonra bu betonların sülfat etkisine maruz bırakılmadan önceki ağrılıkları bulunmuştur. Daha sonra kontrol betonu ile birlikte 11 farklı karışımda üretilen hafif betonların her birinden 3 numune 28 gün ve 3 numune de 56 gün boyunca %10; 3 numune 28 gün ve 3 numune de 56 gün boyunca %20 olmak üzere 2 farklı derişimde hazırlanan  $MgSO_4$  zltilerine ayrı ayrı maruz bırakılmıştır. Her bir karışım için toplamda 12 adet numune  $MgSO_4$  zltisine maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin ağrılıkları belirlenmiştir. Daha sonra, betonların sülfat etkisinde meydana gelen ağrılık kayıpları Denklem 4.9 ile hesaplanmıştır. Benzer şekilde, betonların sülfat etkisine maruz bırakıldıktan sonra  $f_c$

değerleri belirlenmiş ve bu değerler betonların deney öncesi  $f_c$  değerleri ile kıyaslanmıştır. Sülfat etkisine maruz bırakılan betonların görünüşleri Fotoğraf 4.15’de sunulmuştur.



**Fotoğraf 4.15** Sülfat etkisinde kalan betonların görünüşleri

#### 4.7.11 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık deneyi

Yüksek sıcaklık deneyi için beton numuneleri bünyelerinde bulunan suyun yüksek sıcaklık etkisiyle buhar basıncına neden olup numunelere zarar vermemesi için üretimden 28 gün sonra etüvde 24 saat süreyle 105 °C’de bekletilmiştir. Daha sonra, yüksek sıcaklık deneyi öncesinde numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Hafif beton numuneleri TS EN 1363-1 (2013) standardına uygun 6 °C/dk. ısınma ısısına sahip Fotoğraf 4.16’deki yüksek sıcaklık fırınında 400 °C, 600 °C ve 800 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletilmiştir. 3 saat boyunca yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerin çatlamasını önlemek için yüksek sıcaklık fırını 1 gün soğumaya bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların görünüşleri Fotoğraf 4.17’de verilmiştir. 1 gün boyunca yavaşça soğuyan numunelerin ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra, betonlarda yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen ağırlık kayıpları Denklem 4.9 ile hesaplanmıştır. Benzer şekilde, betonların yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra  $f_c$  değerleri belirlenmiş ve bu değerler betonların deney öncesi  $f_c$  değerleri ile kıyaslanmıştır. Ayrıca,

yüksek sıcaklığın alkali ile aktive edilmiş hafif betonlarda meydana getirdiği değişimler hem birbirleriyle hem de kontrol betonuyla kıyaslanmıştır.



**Fotoğraf 4.16** Betonların yüksek sıcaklık fırınındaki görünümüleri



**Fotoğraf 4.17** Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların görünümüleri

$$\text{Ağırlık kaybı} = [(A_i - A_s) / A_i] \times 100 \quad (4.9)$$

Buradaki,  $A_i$ ; betonların asit, sülfat veya yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulmadan önceki ağırlığını (g),  $A_s$ ; betonların asit, sülfat veya yüksek sıcaklık deneyine maruz bırakıldıktan sonraki ağırlığını (g) ifade etmektedir.

#### 4.8 Mikro Yapı Analizleri

Mikro yapı analizleri Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların ve hafif betonların mikro yapılarında ve mineralojik kompozisyonlarında yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler, seçilen numuneler üzerinde SEM (taramalı elektron mikroskobu), EDS (enerji dağılım spektrometresi) nokta, XRD (X-ışını kırınımı) ve PLM (polarize ışık mikroskopisi) analizleri ile incelenmiştir. Çalışmada, SEM ve EDS nokta analizleri için Zeiss EVO 40XVP, XRD analizleri için Philips Panalytical EMPYREAN ve PLM analizleri için Nikon ECLIPSE E400 Pol marka cihazlar kullanılmıştır. XRD analizleri Cu  $K\alpha_1$  ( $K\alpha_1 = 1.5418 \text{ \AA}$ ) radyasyon ve  $2\theta$  tarama aralığı  $5^\circ$  ile  $70^\circ$  arasında ve tarama hızı da  $3^\circ / \text{dk}$ . olacak şekilde yapılmıştır. İnce kesitler üzerinde gerçekleştirilen PLM analizleri  $4 \times 10$  yakınlaştırma ile gerçekleştirilmiştir.

##### 4.8.1 Harçlarda mikro yapı analizleri

Kontrol harçları ile birlikte 100A/6/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 kodlu harçlardan, laboratuvar ortamında yaklaşık  $25^\circ \text{C}$  de bekletilmiş olanlar ile  $400^\circ \text{C}$  ve  $800^\circ \text{C}$  sıcaklığa maruz bırakılan harçlar mikro analiz çalışmaları için seçilmiştir. Seçilen harçların mikro yapılarında yüksek sıcaklık etkisinin ve UK içeriğinin meydana getirdiği değişimler irdelenmiştir. Harçların XRD analizleri seçilen harçlardan alınan numunelerin öğütüldükten sonraki toz halindeki örnekleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. SEM ve EDS nokta analizleri için harçlardan küçük parçalar alınmış ve yeterli iletkenliğin elde edilebilmesi için parçalar altınla kaplanmıştır. Altınla kaplanan parçalar üzerinde SEM analizleri yapılmış, SEM analiz görüntüleri üzerinde işaretlenen noktalarda da EDS nokta analizleri yapılmıştır. PLM analizleri için harç numuneleri reçineye daldırılmış ve reçineyle kaplanan numuneler reçine sertleşinceye kadar laboratuvar ortamında

bekletilmiştir. Daha sonra numuneler üzerine 4x4x0.5 cm boyutlarında cam kesitler yapıştırılmıştır. Cam kesit yapıştırılan numunelerden hassas taş kesme makinesindeki elmas döner testere yardımıyla 5x5x0.03 cm boyutlarındaki ince kesitler alınmıştır. İnce kesitlerden daha iyi görüntü alabilmek için kesitler zımparalanmış ve nemlendirilmiştir.

#### **4.8.2 Betonlarda mikro yapı analizleri**

Alkali ile aktive edilmiş hafif betonların ve kontrol betonlarının mikro yapılarında yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Kontrol betonları ile birlikte 100A/4/0.5, 75A25B/6/1, 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 betonlar mikro analiz çalışmaları için seçilmiştir. XRD analizleri seçilen betonlardan alınan toz halindeki örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Seçilen betonlardan SEM ve EDS analizlerinde kullanılmak üzere küçük parçalar kırılarak alınmıştır. Daha sonra da bu parçalardan yüksek kalitede görüntü alınabilmesi ve yeterli iletkenliğin sağlanması amacıyla parçalar altınla kaplanmıştır. Daha sonra da altınla kaplanan parçalar üzerinde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analiz görüntüleri üzerinde işaretlenen noktalarda da EDS nokta analizleri yapılmıştır. PLM analizleri de seçilen betonlardan alınan 5x5x0.03 cm boyutlarındaki ince kesitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İnce kesitler için öncelikle seçilen betonlardan bir taş kesme makinesi yardımıyla 5x5x10 cm boyutlarında dört eşit prizma numuneler kesilmiştir. Bu dört eşit parçadan biri seçilmiş ve seçilen prizma numunedeki boşluklar ve toz halindeki kalıntılar asetonla temizlenmiştir. Daha sonra, bu prizma numuneler reçineye batırılmış ve reçine sertleşinceye kadar numuneler laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Reçine sertleştikten sonra bu numuneler üzerine 5x5x0.5 cm boyutlarında cam kesitler yapıştırılmıştır. Üzerine cam kesit yapıştırılan numunelerden yine taş kesme makinesindeki elmas döner testere yardımıyla 5x5x0.03 cm boyutlarında ince kesitler alınmıştır. İnce kesitlerin yüzeyleri daha iyi görüntü alabilmek amacıyla zımparalanmış ve nemlendirilmiştir.



## BÖLÜM V

### DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 5.1 Harç Deneyleri

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme içeriği, Na konsantrasyonu ve Ms modülü değişkenlerinin alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlık,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$ , ve  $f_c$  değerlerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre bu değişkenlerin alkali ile aktive edilmiş harçların özelliklerini nasıl etkilediği ayrı ayrı değerlendirilmiş, hem birbirleriyle hem de çimento ile üretilen kontrol harcıyla kıyaslanmıştır. Ayrıca, seçilen harç karışımları üzerinde yüksek sıcaklık deneyleri gerçekleştirilmiş ve yüksek sıcaklığın harçların birim ağırlık,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$ , ve  $f_c$  değerleri ile mikro yapı özelliklerine etkileri araştırılmıştır.

##### 5.1.1 Sertleşmiş birim ağırlık

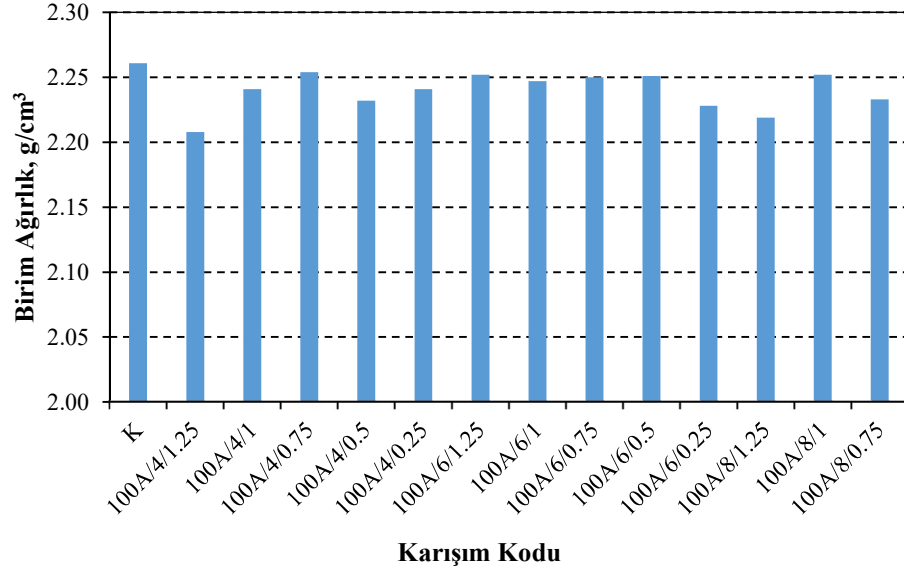
100A serisi harçların birim ağırlık ( $\Delta k$ ) deney sonuçları Çizelge 5.1 ile Şekil 5.1’de verilmiştir. Bu serideki harçların birim ağırlıklarının  $2.208 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.254 \text{ g/cm}^3$  arasında değiştiği ve birbirlerine çok yakın değerler aldığı görülmüştür. Bu serideki karışımların birim ağırlıkları Na konsantrasyonuna veya Ms modülüne göre belirgin bir değişim göstermemiştir. Bununla birlikte, 100A serisi harçların birim ağırlıklarının kontrol harcına göre yaklaşık %2.3’e varan oranlarda düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni YFC malzemesinin özgül ağırlığının çimentoya göre daha düşük olmasıdır.

75A25B serisi harçların birim ağırlıkları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.2’de sunulmuştur. 75A25B harç serisindeki bütün harç karışımlarının birim ağırlıklarının kontrol karışımına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 100A serisi harçların birim ağırlıkları kontrol harcına göre %2.3’e varan oranlarda daha düşük iken, 75A25B harç serisi harçların birim ağırlıkları ise %4.0’e ulaşan oranlarda daha düşük elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak da YFC ve çimentoya göre daha düşük özgül ağırlığa sahip olan UK içeriği gösterilebilir. Ayrıca, 100A serisi harçlarda olduğu gibi bu seride de Na içeriğine ve Ms modülüne göre belirgin bir değişim görülmemiştir.

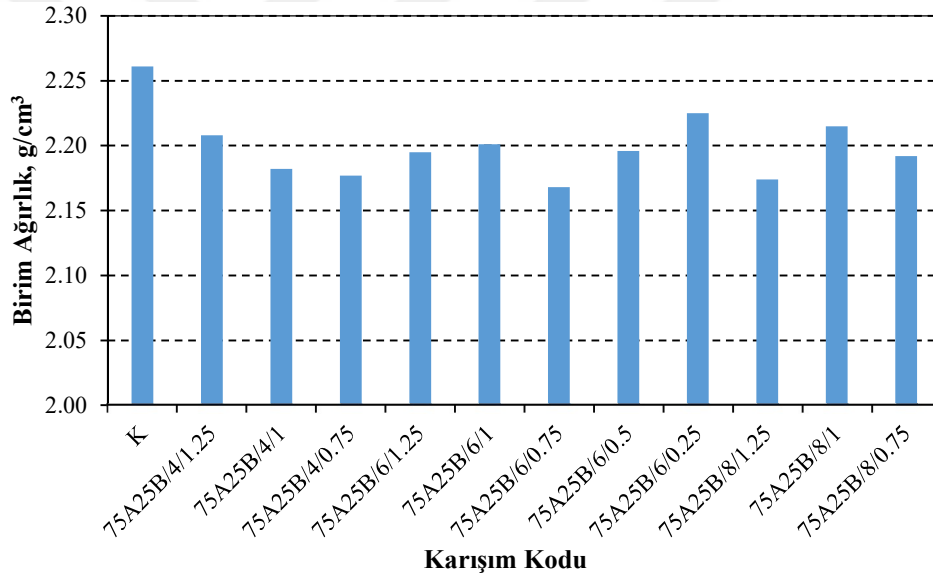
**Çizelge 5.1.** Harçların birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımları

Seri Kodu	Karışım Kodu	f <sub>s</sub> (MPa)			f <sub>c</sub> (MPa)			U <sub>pv</sub> (km/sn)			Δk, (g/cm <sup>3</sup> )
		7 gün	28 gün	56 gün	7 gün	28 gün	56 gün	7 gün	28 gün	56 gün	
K	K	5.86	6.72	6.84	36.6	45.4	47.3	3.4	3.9	4.4	2.261
100A	100A/4/1.25	3.27	4.21	4.58	32.20	42.97	45.20	3.02	3.44	3.82	2.208
	100A/4/1	3.77	4.35	4.79	39.08	44.17	46.92	3.41	3.73	3.98	2.241
	100A/4/0.75	3.85	4.24	4.85	40.10	43.48	47.10	3.59	3.88	4.19	2.254
	100A/4/0.5	4.32	5.33	5.82	44.40	54.60	57.80	4.01	4.56	4.84	2.232
	100A/4/0.25	3.64	4.29	4.71	38.00	42.27	45.70	3.24	3.65	4.01	2.241
	100A/6/1.25	2.96	3.24	3.66	28.90	31.80	35.06	2.71	3.12	3.25	2.252
	100A/6/1	3.19	3.52	4.19	33.39	35.80	42.60	3.17	3.38	3.94	2.247
	100A/6/0.75	3.58	4.27	5.01	37.18	42.45	48.80	3.21	3.71	4.54	2.250
	100A/6/0.5	4.64	5.27	5.66	44.70	52.20	55.30	4.16	4.55	4.81	2.251
	100A/6/0.25	3.11	3.77	3.94	30.80	36.90	38.30	3.11	3.42	3.59	2.228
	100A/8/1.25	2.66	2.81	3.46	26.29	28.38	34.54	2.46	2.61	3.07	2.219
100A/8/1	2.77	3.01	3.29	27.39	29.81	32.56	2.52	2.65	2.99	2.252	
100A/8/0.75	2.84	3.42	3.66	28.01	34.79	36.74	2.77	3.12	3.37	2.233	
75A25B	75A25B/4/1.25	3.46	4.13	4.65	23.54	27.72	32.56	2.21	2.38	2.96	2.208
	75A25B/4/1	3.74	4.42	5.32	26.30	29.92	36.85	2.30	2.82	3.21	2.182
	75A25B/4/0.75	3.92	4.76	5.56	28.82	33.26	37.84	2.52	2.95	3.44	2.177
	75A25B/6/1.25	3.69	4.92	5.32	24.53	32.87	36.42	2.12	2.90	3.36	2.195
	75A25B/6/1	4.61	5.67	6.38	34.48	40.22	43.78	3.02	3.62	4.12	2.201
	75A25B/6/0.75	4.94	5.86	6.56	36.55	41.38	45.60	3.16	3.74	4.26	2.168
	75A25B/6/0.5	3.56	4.58	5.04	26.60	32.40	35.62	2.50	2.79	3.25	2.196
	75A25B/6/0.25	2.98	3.68	3.86	18.80	24.80	26.00	1.80	2.16	2.41	2.225
	75A25B/8/1.25	3.43	4.48	4.97	28.41	35.48	39.82	2.42	2.96	3.31	2.174
	75A25B/8/1	3.56	4.37	4.85	28.88	32.70	36.20	2.44	3.01	3.26	2.215
75A25B/8/0.75	3.38	4.43	5.11	28.05	34.56	39.05	2.32	2.94	3.42	2.192	
50A50B	50A50B/4/1.25	3.98	4.53	4.85	20.31	24.35	28.81	1.86	2.38	2.76	2.178
	50A50B/4/1	3.87	4.31	4.48	16.39	22.10	24.12	1.78	2.21	2.64	2.156
	50A50B/4/0.75	1.22	1.72	2.03	10.10	11.64	13.33	1.52	1.80	1.94	2.185
	50A50B/6/1.25	4.69	5.44	6.36	28.73	32.36	39.14	2.68	3.15	3.67	2.188
	50A50B/6/1	5.26	6.70	7.06	29.92	35.82	41.10	2.74	3.47	3.94	2.162
	50A50B/6/0.75	4.19	4.45	5.02	22.60	26.34	30.90	2.01	2.36	2.66	2.184
	50A50B/6/0.5	3.24	3.77	3.94	17.20	18.80	21.36	1.72	2.04	2.19	2.192
	50A50B/6/0.25	3.03	3.26	3.45	14.32	15.54	17.75	1.57	1.83	1.98	2.172
	50A50B/8/1.25	4.13	4.54	5.16	26.57	29.70	36.18	2.64	2.91	3.39	2.149
	50A50B/8/1	2.51	2.91	3.45	23.44	26.24	31.32	2.52	2.67	2.94	2.181
50A50B/8/0.75	2.27	2.75	3.21	18.58	21.82	26.14	1.89	2.31	2.59	2.194	
25A75B	25A75B/4/1.25	4.88	5.21	5.58	19.72	21.97	25.44	2.10	2.50	2.74	2.138
	25A75B/4/1	3.25	4.13	4.50	14.95	18.66	21.41	2.00	2.40	2.62	2.142
	25A75B/4/0.75	0.00	1.15	1.63	7.31	9.75	12.08	0.90	1.40	1.70	2.144
	25A75B/6/1.25	6.00	6.60	7.26	31.91	38.58	41.87	2.90	3.20	3.77	2.133
	25A75B/6/1	7.05	7.58	9.13	35.19	39.89	44.94	3.00	3.46	3.98	2.139
	25A75B/6/0.75	5.88	6.28	6.93	31.38	34.34	38.27	2.60	3.11	3.42	2.138
	25A75B/8/1.25	5.69	6.34	7.00	31.91	34.87	39.11	2.60	3.14	3.58	2.141
	25A75B/8/1	5.06	5.50	6.50	31.75	35.51	39.01	2.50	3.06	3.49	2.142
25A75B/8/0.75	4.38	5.35	6.25	31.59	33.39	35.62	2.60	2.88	3.33	2.148	
100B	100B/4/1.25	1.80	2.86	3.44	11.20	14.50	19.05	1.40	1.90	2.30	2.123
	100B/4/1	1.50	2.31	3.01	10.00	12.45	14.90	1.20	1.30	1.60	2.122
	100B/4/0.75	1.10	1.40	1.50	6.56	7.45	8.10	0.80	0.85	0.90	2.135
	100B/6/2	4.90	5.98	6.31	25.20	32.42	38.63	2.00	2.50	3.10	2.136
	100B/6/1.5	7.13	9.01	10.04	34.26	42.50	46.81	3.10	3.60	4.10	2.131
	100B/6/1.25	5.60	7.35	7.58	25.30	34.20	39.84	2.60	2.90	3.30	2.138
	100B/6/1	5.10	6.27	7.13	20.60	27.30	36.25	2.50	2.60	3.00	2.126
	100B/6/0.75	3.20	4.95	5.46	16.80	21.64	28.51	1.90	2.20	2.50	2.134
	100B/8/2	3.10	4.62	4.78	16.90	23.70	26.36	1.70	2.06	2.20	2.112
	100B/8/1.5	3.40	4.74	5.07	23.10	31.15	34.20	2.20	2.40	2.80	2.136
	100B/8/1.25	8.40	10.02	11.05	41.20	51.12	57.24	3.25	3.90	4.50	2.125
	100B/8/1	6.40	7.59	7.86	28.10	33.92	36.80	2.90	3.25	3.40	2.141
100B/8/0.75	4.20	5.12	5.30	14.20	21.87	24.41	2.30	2.50	2.90	2.132	





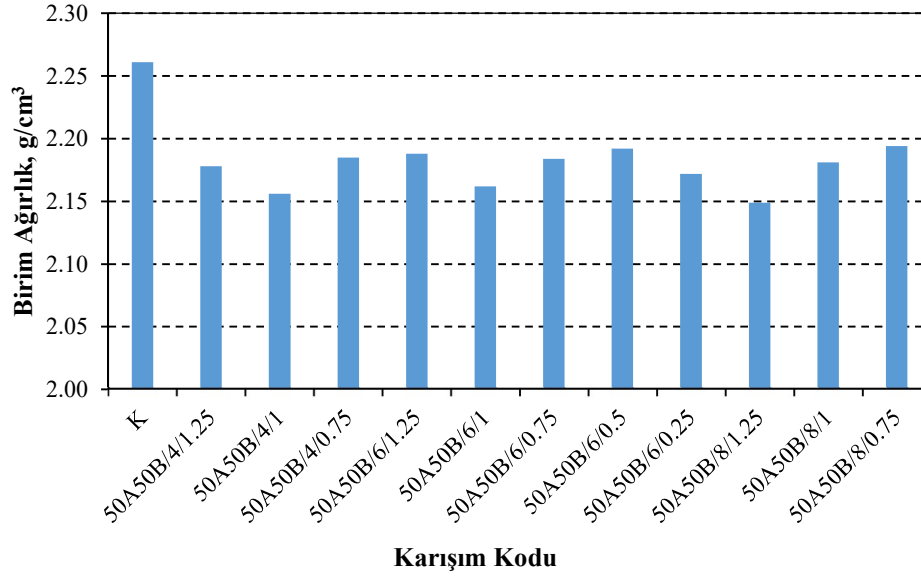
**Şekil 5.1.** 100A serisi harçların birim ağırlıkları



**Şekil 5.2.** 75A25B serisi harçların birim ağırlıkları

50A50B serisi harçların birim ağırlık deney sonuçları Çizelge 5.1 ile Şekil 5.3'de verilmiştir. Bu serideki harç karışımlarının birim ağırlıkları  $2.149 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.194 \text{ g/cm}^3$  arasında değişmiştir. 50A50B serisinde en düşük birim ağırlık 50A50B/8/1.25 harç karışımında, en yüksek birim ağırlık ise 50A50B/8/0.75 harç karışımında gözlenmiştir. Bu durum 50A50B serisi karışımların birim ağırlıklarında 100A ve 75A25B serisi harçlarda da olduğu gibi Na içeriğine bağlı orantılı bir değişimin olmadığını göstermektedir. Bununla birlikte, bu seride %4 Na içeriği ile üretilen harçlarda en düşük birim ağırlık Ms modülünün 0.75 olduğu karışımda görülürken, Na içeriği %8 olduğunda

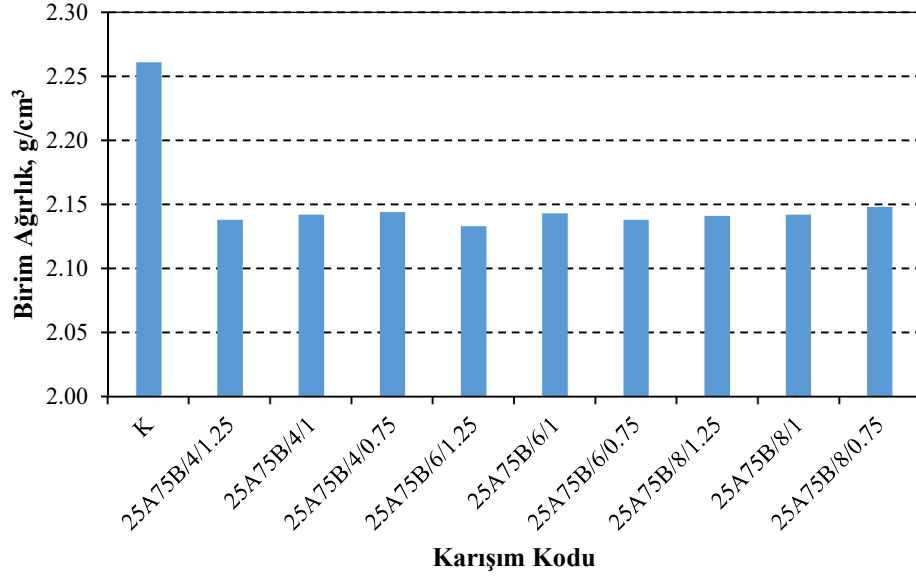
ise en düşük birim ağırlık Ms modülünün 1.25 olduğu karışımda elde edilmiştir. Bu nedenle 50A50B serisi harçların birim ağırlıkları Ms modülüne göre de belirgin bir değişim göstermemiştir.



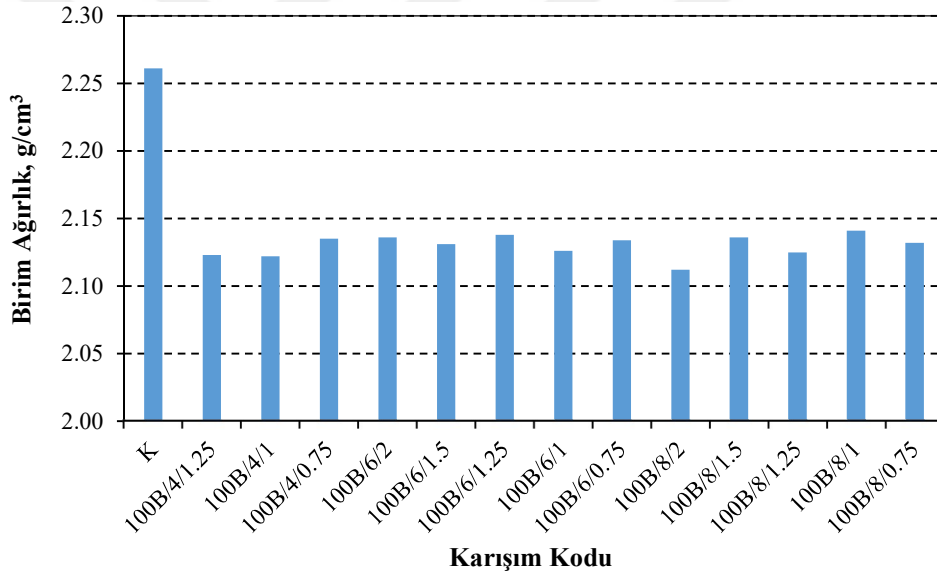
**Şekil 5.3.** 50A50B serisi harçların birim ağırlıkları

25A75B serisi harçların birim ağırlıkları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.4’de sunulmuştur. 25A75B serisi harçların birim ağırlıklarının Na konsantrasyonuna ve Ms modülüne bağlı orantılı bir değişim göstermediği görülmüştür. Bununla birlikte, UK içeriği ile harçların birim ağırlıklarındaki azalma devam etmiş ve 25A75B serisi harçların birim ağırlıklarının kontrol harcına göre %5.7’ye varan oranlarda daha düşük olduğu gözlenmiştir. 25A75B serisi harçlarda en yüksek birim ağırlık 25A75B/8/0.75 kodlu karışımda en düşük birim ağırlık ise 25A75B/6/1.25 kodlu karışımda gözlenmiştir.

100B serisi harçların birim ağırlıkları Çizelge 5.1 ve Şekil 5.5’de gösterilmiştir. Bu şekil ve çizelgeye göre, 100B serisi harçların birim ağırlıklarının 2.112 g/cm<sup>3</sup> ile 2.138 g/cm<sup>3</sup> arasında değişen değerler aldığı görülmüştür. Bununla birlikte, bu seride en düşük birim ağırlık 100B/8/2 kodlu karışımda gözlenirken en yüksek birim ağırlık 100B/6/1.25 kodlu karışımda gözlenmiştir. Ayrıca, 100B serisi harçların birim ağırlıklarının kontrol harcına göre %6.6’ya varan oranlarda daha düşük olduğu görülmüştür.



**Şekil 5.4.** 25A75B serisi harçların birim ağırlıkları



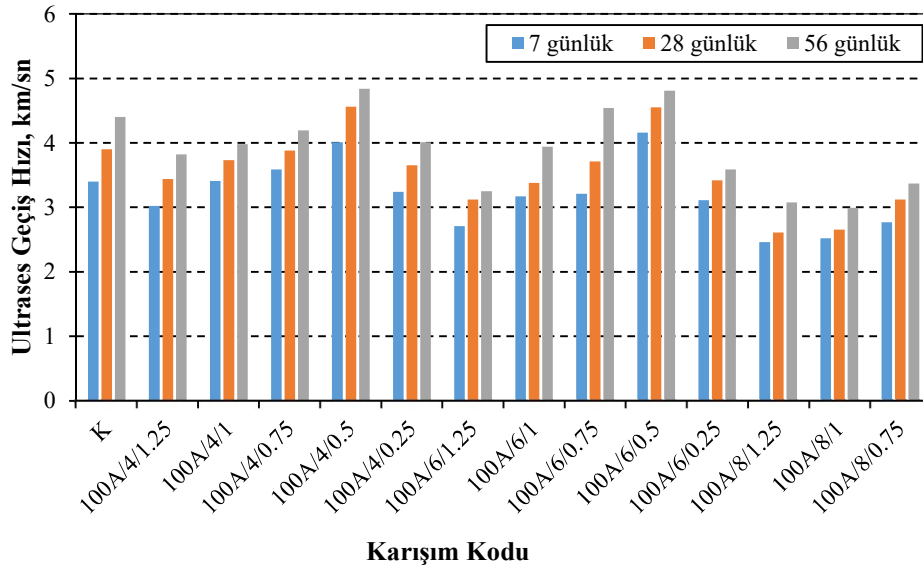
**Şekil 5.5.** 100B serisi harçların birim ağırlıkları

Bu çalışma kapsamında üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlıkları  $2.112 \text{ g/cm}^3$  ile  $2.254 \text{ g/cm}^3$  arasında değişen değerler alırken kontrol harcının birim ağırlığının  $2.261 \text{ g/cm}^3$  olduğu gözlenmiştir. Na konsantrasyonu ve Ms modülü harçların birim ağırlıkları üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır. Bunun nedeni olarak harç karışımlarının %4 ile %8 arasında düşük Na konsantrasyonları ile oluşturulması gösterilebilir. Bununla birlikte, bağlayıcı malzeme türü harçların birim ağırlıkları üzerinde etkili olmuştur. YFC ve UK malzemelerinin özgül ağırlıklarının çimentoya göre daha düşük olması nedeniyle alkali ile aktive edilmiş harçların tamamının birim

ağırlıklarının kontrol harcına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, UK malzemesinin özgül ağırlığının YFC malzemesine göre daha düşük olması, karışımlarda UK içeriği ile birlikte birim ağırlıkların azalmasına neden olmuştur.

### 5.1.2 Ultrases geçiş hızı

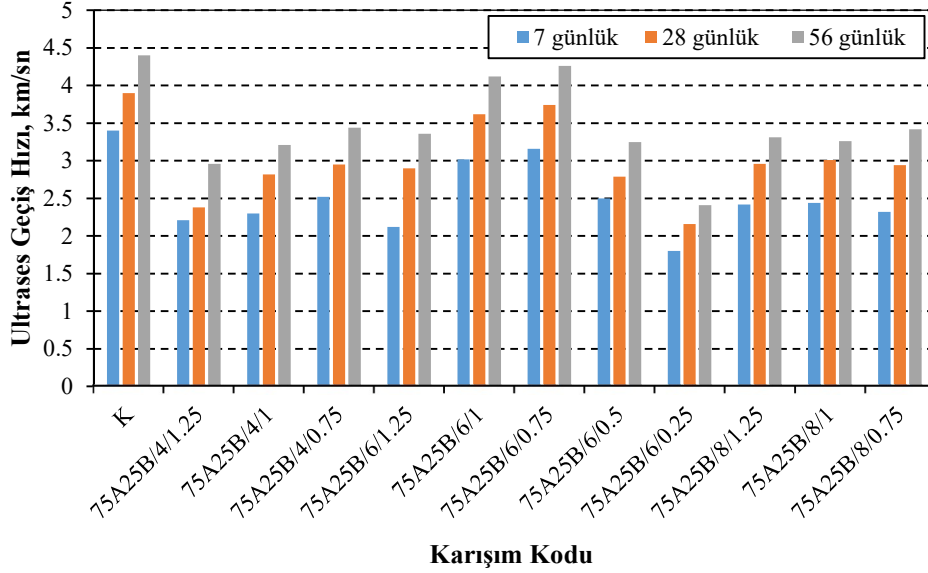
100A serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.6'da gösterilmiştir. 100A serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri Ms modülünün 1.25 den 0.5'e düşmesi ile genellikle kademeli olarak artmıştır. Ancak bu artış Ms modülünün 0.25 olduğu karışımlarda devam etmemiştir. Bununla birlikte, %4 ve %6 Na konsantrasyonu ile elde edilen yüksek  $U_{pv}$  değerleri, %8 Na içeren numunelerde elde edilememiştir. En yüksek  $U_{pv}$  değerleri 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu karışımlarda gözlenmiştir. 100A serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri kontrol harcına göre genellikle düşük iken, 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu karışımlarda kontrol harcına göre daha yüksek  $U_{pv}$  değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.6. 100A serisi harçların ultrases geçiş hızları

75A25B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.7'de verilmiştir. 75A25B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri 100A serisi ile benzer şekilde Ms modülünün 1.25'den 0.75'e düşmesi ile artmıştır. Ancak, Ms modülünün 0.75'den daha az olduğu durumda bu artış devam etmemiş, aksine  $U_{pv}$  değerleri azalmıştır. Bunun nedeni olarak Ms modülüne göre UK malzemesinin YFC malzemesi ile benzer davranış

sergilememesi gösterilebilir. Bununla birlikte, bu seride en yüksek  $U_{pv}$  değerlerine 75A25B/6/1 ve 75A25B/6/0.75 kodlu karışımlarda ulaşılmıştır. Ayrıca, 75A25B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri kontrol harcına göre daha düşük değerler almıştır.

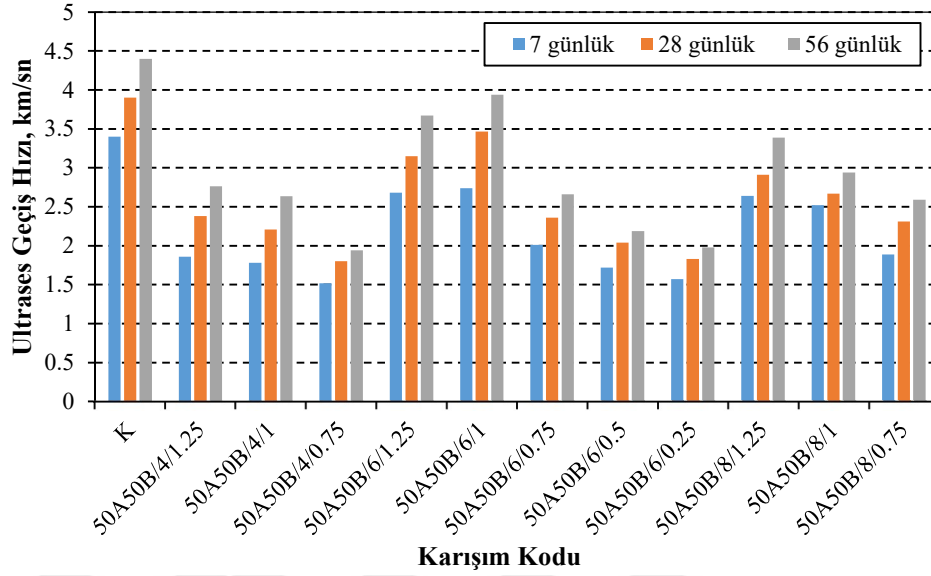


Şekil 5.7. 75A25B serisi harçların ultrasres geçiş hızları

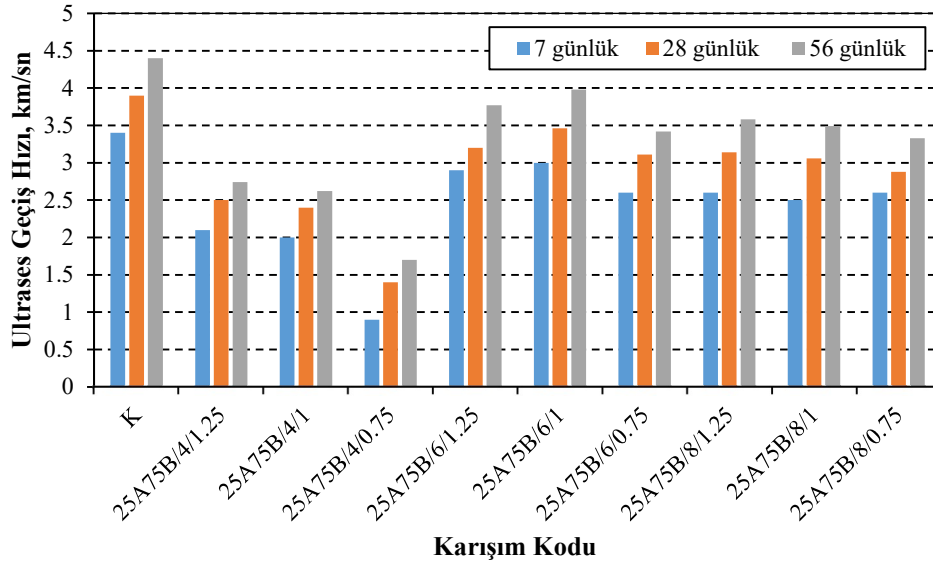
50A50B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bu şekil ve çizelgeye göre 100A ve 75A25B serilerinden farklı olarak %4 ve %8 Na ile üretilen 50A50B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri Ms modülünün artması ile birlikte artmıştır. Bununla birlikte, %6 Na içeren 50A50B serisi harçlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri Ms modülünün 1 olduğu karışımda görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak YFC malzemesinin daha düşük Ms modülü ile aktive olması, UK malzemesinin daha yüksek Ms modülü ile aktive olması gösterilebilir. Ayrıca, 50A50B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri kontrol harcına göre daha düşük değerler almıştır.

25A75B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu şekil ve çizelgeye göre 25A75B serisi harçlarda %4 Na konsantrasyonu ile üretilen harçların  $U_{pv}$  değerlerinin %6 ve %8 ile üretilen harçlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, en yüksek  $U_{pv}$  değerlerine %6 Na içeren karışımlarda ulaşılmıştır. Ms modülünün 0.75 olduğu karışımlarda düşük  $U_{pv}$  değerleri elde edilirken, Ms modülünün 1 ve 1.25 olduğu karışımlarda birbirlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. 25A75B serisi harçlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerlerine 25A75B /6/1 kodlu

harçlarda ulaşılmıştır. Ayrıca, 25A75B serisi harçların  $U_{pv}$  değerlerinin kontrol harcına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.



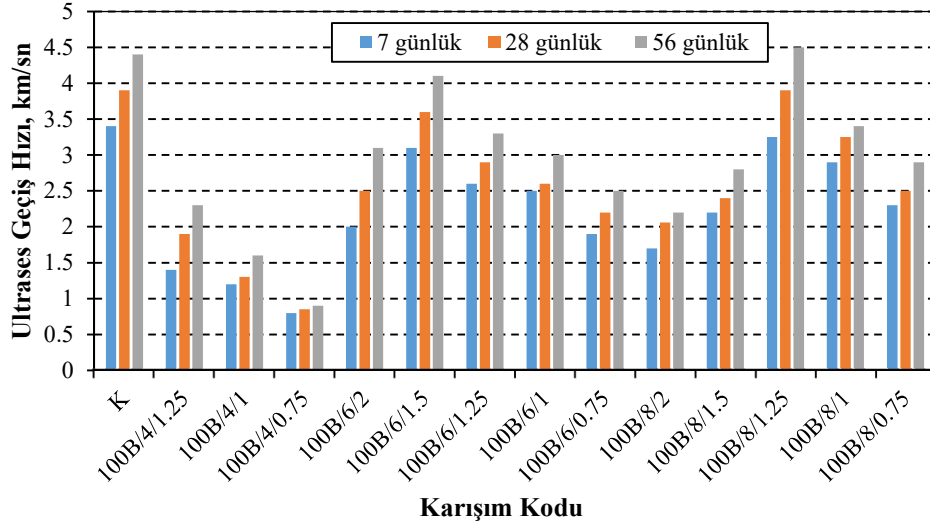
Şekil 5.8. 50A50B serisi harçların ultrases geçiş hızları



Şekil 5.9. 25A75B serisi harçların ultrases geçiş hızları

100B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.10'da sunulmuştur. Bu serideki harçların  $U_{pv}$  değerleri Na konsantrasyonunun artması ile birlikte genellikle artmıştır. Ayrıca, Ms modülünün 0.75 den 1.25'e çıkması ile genellikle  $U_{pv}$  değerlerinde artış görülmüştür.  $U_{pv}$  değerlerindeki bu artış %6 Na ile üretilen harçlarda Ms değeri 1.5'e ulaşıncaya kadar devam ederken %8 Na ile üretilenlerde en

yüksek  $U_{pv}$  değerlerine  $M_s$  değeri 1.25 olan harçlarda ulaşılmıştır. 100B serisi harçlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 100B/6/1.5 ve 100B/8/1.25 kodlu harçlarda gözlenmiştir. 100B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri kontrol harcına göre genellikle düşük iken, 100B/8/1.25 kodlu harçlarının 28 günlük  $U_{pv}$  değerinin kontrol harcıyla eşit, 56 günlük  $U_{pv}$  değerinin ise kontrol harcına göre daha yüksek olduğu görülmüştür.



**Şekil 5.10.** 100B serisi harçların ultras ses geçiş hızları

Bu çalışmada üretilen 100A serisi harçların  $U_{pv}$  değerlerinin 2.46 km/sn ile 4.84 km/sn arasında, 75A25B serisi harçların 1.80 km/sn ile 4.26 km/sn arasında, 50A50B serisi harçların 1.52 km/sn ile 3.94 km/sn arasında, 25A75B serisi harçların 0.90 km/sn ile 3.98 km/sn arasında ve 100B serisi harçların da 0.80 km/sn ile 4.50 km/sn arasında değişen değerler aldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre bağlayıcı malzemelerin tek başlarına kullanıldığı alkali ile aktive edilmiş 100A ve 100B serileri harçlarda daha yüksek  $U_{pv}$  değerlerinin elde edilebildiği görülmüştür. Bu iki bağlayıcı maddenin karışımı ile üretilen diğer 3 seride  $U_{pv}$  değerlerinin daha düşük olmasının bir nedeni olarak alkali ile aktive edilen bu maddelerden meydana gelen jel yapılarının farklı olması nedeniyle bu jellerin harçlarda birlikte yer almasının daha heterojen ve boşluklu bir yapı meydana getirmesi gösterilebilir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş harçların ve kontrol harcının  $U_{pv}$  değerleri kür sürelerinin artmasıyla birlikte genellikle artmıştır.  $U_{pv}$  değerlerine göre harç ve betonlar pratikte Çizelge 5.2'ye göre değerlendirilebilir. Çizelge 5.2'ye göre bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş harçların “çok zayıf” ve “mükemmel” arasında değişen kaliteye sahip olduğu söylenebilir. Bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş harç

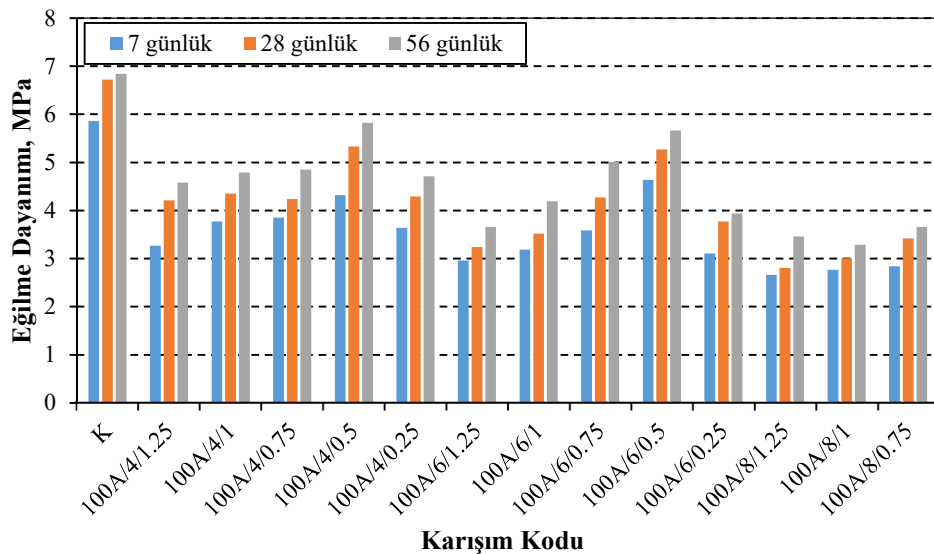
serilerinden sadece 100A ve 100B serilerinde kontrol karışımına göre daha yüksek kaliteye sahip “mükemmel” sınıfına giren harçlar elde edilebilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Ultrases geçiş hızı ile beton kalitesinin değerlendirilmesi (Erdoğan, 2003)

$U_{pv}$ , km/sn	Beton Kalitesi
> 4.5	Mükemmel
4.5-3.5	İyi
3.5-3.0	Şüpheli
3.0-2.0	Zayıf
< 2	Çok Zayıf

### 5.1.3 Eğilme dayanımı

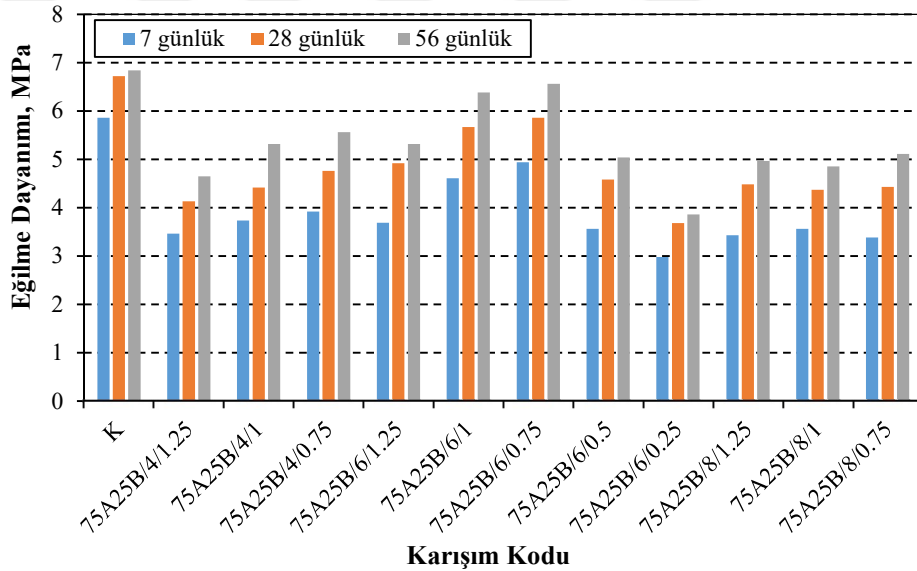
100A serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinin Na konsantrasyonu ile birlikte genellikle azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, Ms modülünün azalması ile 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinin genel itibariyle arttığı görülmüştür. Bu artış %4 ve %6 Na içeren harçlarda Ms modülü 1.25’den 0.5 olana kadar devam etmiş, Ms modülü 0.25 olduğunda ise 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri azalmıştır. 100A serisi harçların tamamının  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımına göre daha düşük olduğu görülürken, bu seride en yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği 100A/4/0.5 kodlu karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımı değerlerine göre sırasıyla %26, %21 ve %15 oranlarında daha düşük olduğu gözlenmiştir.



**Şekil 5.11.** 100A serisi harçların eğilme dayanımları



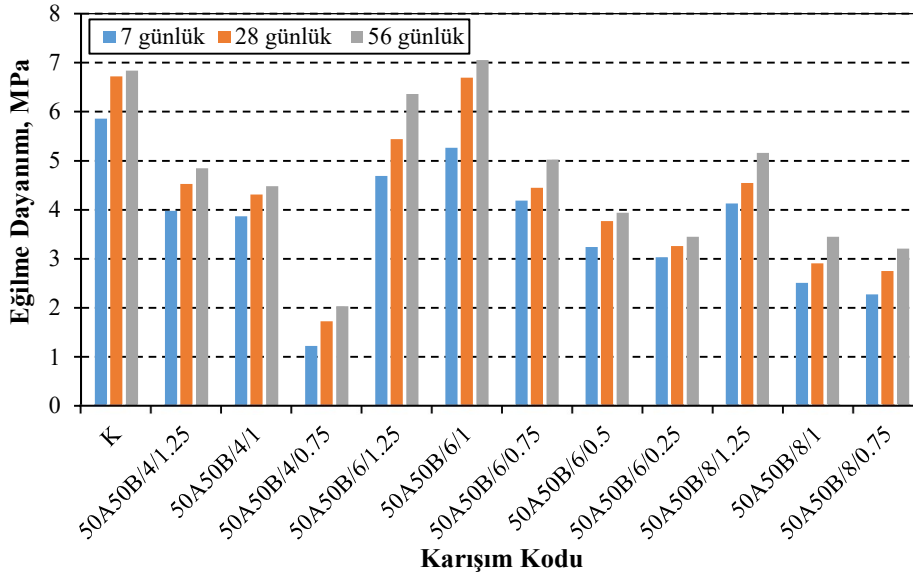
75A25B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.12’de sunulmuştur. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, 75A25B serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda görülmüştür. Bununla birlikte, %4 ve %6 Na içeren 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinde  $M_s$  modülünün 1.25’den 0.75’e düşmesi ile birlikte genel itibariyle bir artış gözlenirken, %8 Na içeren harçların  $f_{fs}$  değerlerinde ise  $M_s$  modülüne göre belirgin bir değişim gözlenmemiştir. En yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği %6 Na içeren harçlarda daha yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla 0.25 ve 0.5  $M_s$  modülü ile üretilen harç karışımlarında bu artış devam etmemiş, hatta  $f_{fs}$  değerleri azalmıştır. 75A25B serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 75A25B/6/0.75 kodlu karışımdan elde edilmiştir. Ayrıca, 75A25B/6/0.75 kodlu karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımı değerlerine göre sırasıyla %15, %12 ve %4 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.12. 75A25B serisi harçların eğilme dayanımları

50A50B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.13’de verilmiştir. 50A50B serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri %6 Na içeren harçlarda gözlenmiştir. Ayrıca, 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri farklı Na konsantrasyonuna sahip karışımlarda  $M_s$  modülüne göre benzer değişim göstermemiştir. %4 ve %8 Na içeren karışımlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri  $M_s$  modülü 1.25 olan harçlardan elde edilirken, %6 Na içeren karışımlarda ise  $M_s$  modülü 1 olan karışımlardan elde edilmiştir. Bu seride en yüksek  $f_{fs}$  değerlerine 50A50B/6/1 kodlu karışımlarda ulaşılmıştır. 50A50B/6/1 kodlu karışım hariç 50A50B serisindeki diğer 10 karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin

kontrol karışımı değerlerine göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, 50A50B/6/1 kodlu karışımın 7 günlük  $f_{fs}$  değerinin kontrol karışımı değerinden %10 oranında daha düşük olduğu, 28 günlük  $f_{fs}$  değerinin kontrol karışımı değeri ile neredeyse eşit olduğu ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerinin de kontrol karışımı değerinden %3 oranında daha yüksek olduğu görülmüştür.

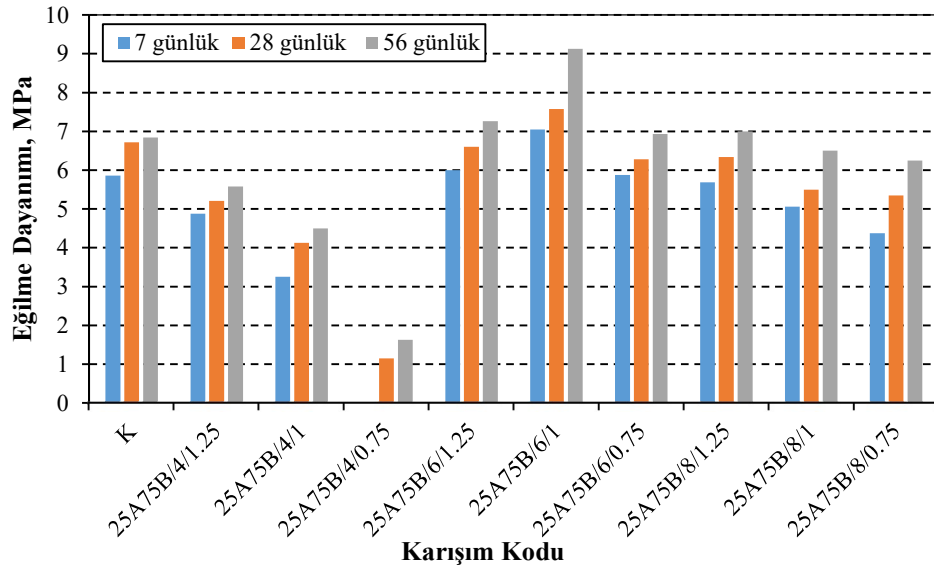


Şekil 5.13. 50A50B serisi harçların eğilme dayanımları

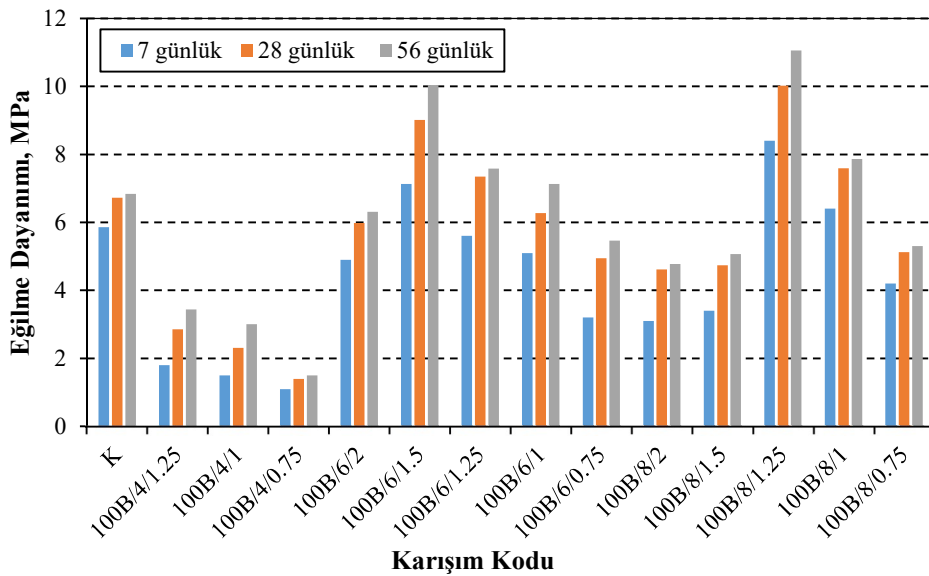
25A75B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.14'de sunulmuştur. 25A75B serisinde en düşük  $f_{fs}$  değerleri %4 Na içeren karışımlarda görülürken, en yüksek  $f_{fs}$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda gözlenmiştir. Bununla birlikte, %4 ve %8 Na içeren karışımların  $f_{fs}$  değerleri Ms modülündeki artış ile birlikte artarken, %6 Na içeren karışımlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri Ms değeri 1 olan karışımda gözlenmiştir. Bu seride %4 ve %8 Na içeren tüm karışımların  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımı değerlerine göre daha düşük olduğu görülürken, %8 Na içeren karışımlarda sadece 25A75B/8/1.25 kodlu karışımının 56 günlük  $f_{fs}$  değerinin kontrol karışımına göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, 25A75B serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği 25A75B/6/1 kodlu karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımına göre sırasıyla %20, %13 ve %33 oranlarında daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

100B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.15'de sunulmuştur. Bu şekil ve çizelgede 100B serisi harçlarda en düşük  $f_{fs}$  değerleri %4 Na

içeren harçlarda görülmüştür. Ayrıca, bu seride %4 Na içeren harçların  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımına göre %80'e varan oranlarda daha düşük olduğu gözlenmiştir. 100B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri Ms modülünün 0.75'ten 1.25'e çıkması ile birlikte belirgin bir şekilde artmıştır. Bu artış, %6 Na içeren karışımlarda Ms modülü 1.5 iken de devam etmiş, ancak %8 Na içeren karışımlarda devam etmemiştir. Bu serideki en yüksek  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği 100B/8/1.25 kodlu karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol karışımı değerlerine göre sırasıyla %43, %49 ve %62 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.14. 25A75B serisi harçların eğilme dayanımları

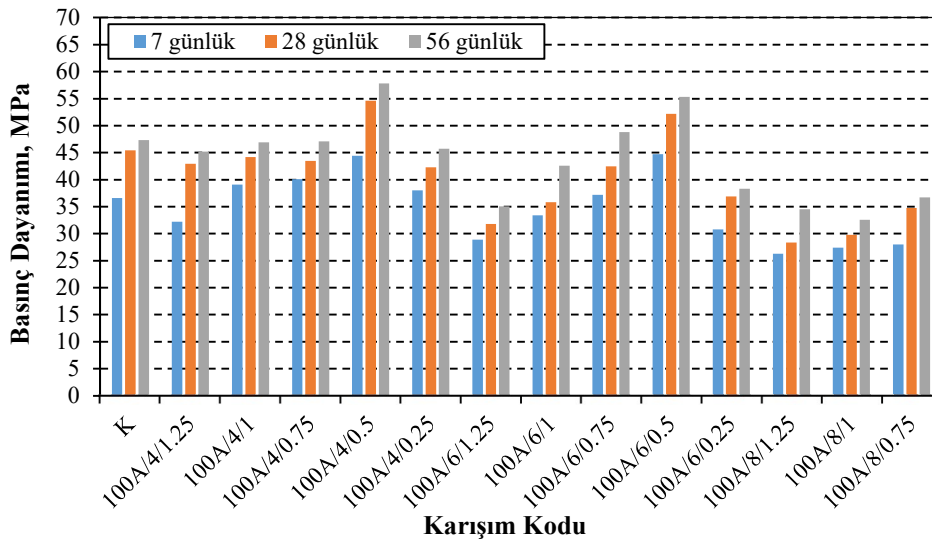


Şekil 5.15. 100B serisi harçların eğilme dayanımları

Bağlayıcı malzeme olarak YFC ile birlikte UK kullanılan alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_{fs}$  değerlerinin UK içeriği ile birlikte arttığı görülmüştür. Ayrıca, bağlayıcı malzeme olarak sadece YFC kullanılan alkali ile aktive edilmiş 100A serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri %4 Na ile üretilen karışımlardan elde edilirken, bağlayıcı malzeme olarak sadece UK kullanılan alkali ile aktive edilmiş 100B serisi harçlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri %8 Na ile üretilen karışımlardan elde edilmiştir.

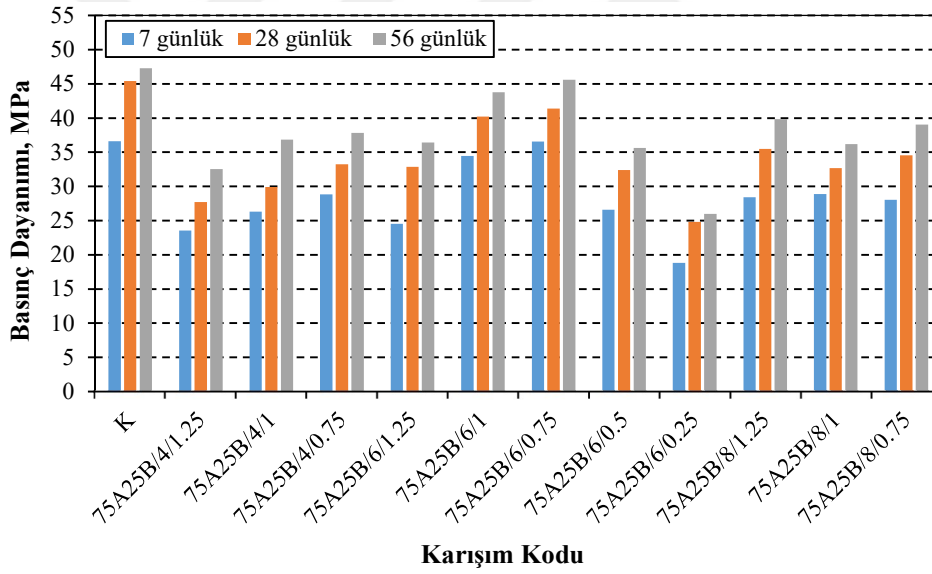
#### 5.1.4 Basınç dayanımı

Bağlayıcı madde olarak sadece YFC içeren alkali ile aktive edilmiş 100A serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.16'da verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde,  $M_s$  modülünün 1.25'den 0.75'e düşmesi ile 100A serisi harçların  $f_c$  değerlerinin genel itibarıyla arttığı görülmüştür. Bu artış %4 ve %6 Na içeren harçlarda  $M_s$  modülü 0.5 olana kadar devam etmiş,  $M_s$  modülü 0.25 olduğunda ise 100A serisi harçların  $f_c$  değerleri azalmıştır. 100A serisi harçların  $f_c$  değerleri üzerinde Na konsantrasyonunun etkileri incelendiğinde ise en optimum sonuçlara %4 Na içeren karışımlarda ulaşıldığı görülmüştür. Ayrıca, 100A serisi harçların  $f_c$  değerlerinin Na konsantrasyonu ile birlikte orantısız olarak artmadığı ve hatta en düşük değerlere %8 Na içeren harçların sahip olduğu görülmüştür. 100A serisi harçların  $f_c$  değerleri genel itibarıyla kontrol harcından daha düşük iken, bu serideki en yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edildiği 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 karışımlarının 28 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol karışımına göre sırasıyla %17 ve %13 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.16. 100A serisi harçların basınç dayanımları

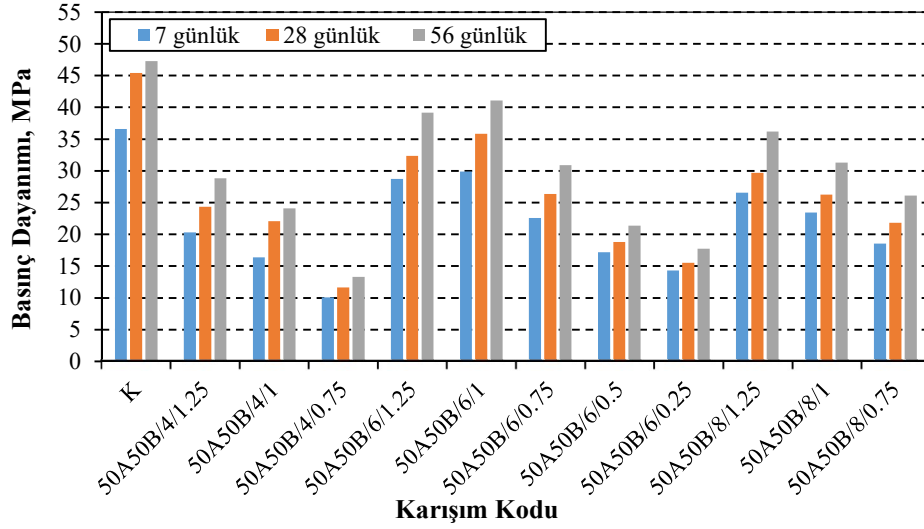
75A25B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.17’de sunulmuştur. Bu şekil ve çizelgeye göre, 75A25B serisi harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda görülmüştür. Bununla birlikte, % 4 ve % 6 Na içeren 75A25B serisi harçların  $f_c$  değerleri  $M_s$  modülünün 1.25’den 0.75’e düşmesi ile birlikte genel itibariyle artarken, %8 Na içeren harçlarda ise  $M_s$  modülüne göre belirgin bir  $f_c$  değişimi gözlenmemiştir. En yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edildiği %6 Na içeren harçlarda daha yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla 0.25 ve 0.5  $M_s$  modülü ile üretilen harç karışımlarında, bu artış devam etmemiş, hatta  $f_c$  değerleri azalmıştır. 75A25B serisi harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 75A25B/6/1 kodlu karışımdan elde edilmiştir. 75A25B/6/1 kodlu karışımın 7 günlük  $f_c$  değeri kontrol harçlarına eşitken, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol harçlarından sırasıyla %8 ve %3 oranlarında daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, 75A25B/6/1 kodlu karışım hariç bu serideki harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol harçlarına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.17. 75A25B serisi harçların basınç dayanımları

50A50B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.18’de verilmiştir. Bu seride 75A25B serisinde olduğu gibi en yüksek  $f_c$  değerleri %6 Na içeren karışımlardan elde edilmiştir. Ayrıca, bu seride %4 ve %8 Na ile üretilen harçların  $f_c$  değerleri  $M_s$  modülündeki artış ile birlikte artarken, %6 Na ile üretilen harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 50A50B/6/1 kodlu harçlarda görülmüştür. 50A50B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile kontrol harçlarının değerleri kıyaslandığında bu harçların

7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol harçlarına göre sırasıyla %18 ile %72, %21 ile %74 ve %13 ile %71 oranları arasında daha düşük olduğu görülmüştür.

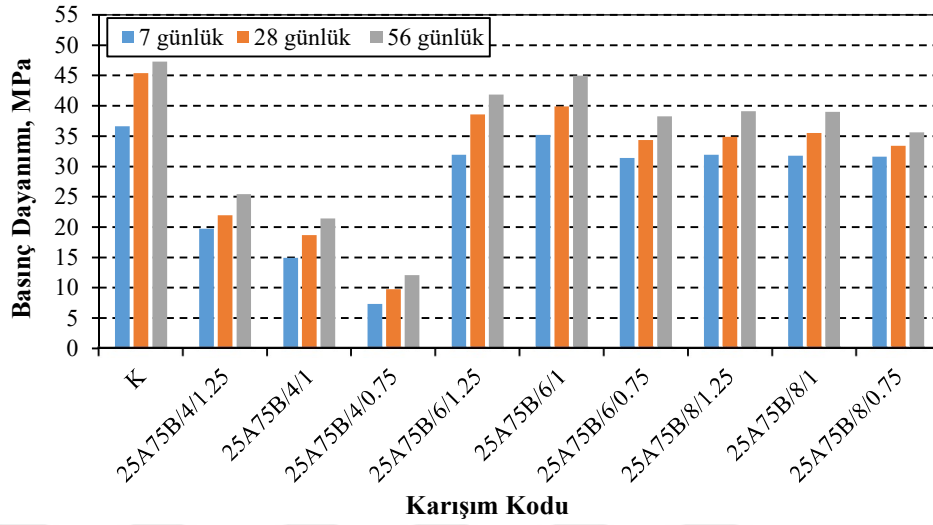


Şekil 5.18. 50A50B serisi harçların basınç dayanımları

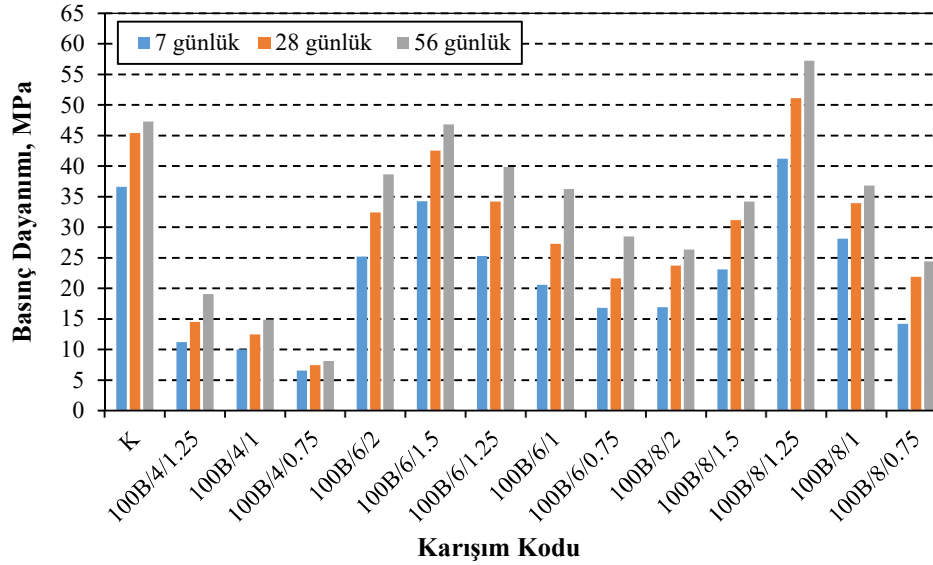
25A75B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.19'da sunulmuştur. 25A75B serisi harçlarda %4 Na içeriğinin bu harçları aktive etmede etkisi az olmuştur. Bundan dolayı bu seride, en düşük  $f_c$  değerleri %4 Na ile üretilen harçlarda görülmüştür. Bununla birlikte 25A75B serisi harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda görülmüştür. Bu seride %4 Na ile üretilen harçlarda Ms modülünün artması ile  $f_c$  değerlerinde de artış görülürken, %6 ve %8 Na ile üretilen harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri Ms modülü 1 olan karışımlarda görülmüştür. 25A75B serisi harçlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 25A75B/6/1 kodlu karışımdan elde edilirken bu karışımın 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol karışımının  $f_c$  değerlerine göre sırasıyla %4, %12 ve %5 oranlarında daha düşük olduğu gözlenmiştir.

100B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.1 ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Bu seride de harçların %4 Na konsantrasyonu gibi düşük Na içeriği ile çok az aktive olduğu görülmüştür. 100B serisi harçlarda Ms modülünün 0.75'ten 1.25'e çıkması ile 100B serisi harçların  $f_c$  değerlerinin genel itibariyle arttığı görülmüştür. Bu artış %6 Na içeren harçlarda Ms modülü 1.5 olana kadar devam ederken %8 Na içeren harçlarda ise optimum Ms değeri 1.25 olmuştur. 100B/8/1.25 kodlu harçlar hariç olmak üzere 100B serisi harçların  $f_c$  değerlerinin kontrol harcından daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu serideki en yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edildiği 100B/8/1.25 kodlu

harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin, kontrol karışımına göre sırasıyla %13, %13 ve %21 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 5.19. 25A75B serisi harçların basınç dayanımları



Şekil 5.20. 100B serisi harçların basınç dayanımları

Alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_c$  değerleri bağlayıcı madde içeriğine, Na konsantrasyonlarına ve Ms modüllerine göre farklılık göstermiştir. 100A serisi harçlarda en yüksek  $f_c$  değerlerine %4 Na ile üretilen harçlarda ulaşılırken, 100B serisi harçlarda ise %8 Na ile üretilen harçlarda ulaşılmıştır. İkili bağlayıcı madde karışımı (YFC ve UK) ile üretilen harçlarda ise en yüksek  $f_c$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda görülmüştür. Bununla birlikte, harçların  $f_c$  değerleri bağlayıcı madde içeriğine bağlı olarak, Ms

modülüne göre de farklılık göstermiştir. Buna göre, 100A serisi harçlarda yüksek  $f_c$  değerleri  $M_s$  modülü 0.5 olan harçlarda gözlenirken, 100B serisi harçlarda ise  $M_s$  modülü 1.25 olan harçlarda gözlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda da, YFC malzemesi alkaliler ile aktive edilmiş ve elde edilen bağlayıcı malzemelerde en yüksek  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerinin elde edildiği optimum  $M_s$  değeri araştırılmıştır (Bakharev vd., 1999; Aydın ve Baradan, 2014; Bilim vd., 2013). Bu çalışmalarda rapor edilen optimum  $M_s$  değeri değişkenlik göstermiştir. Bu tez çalışmasında 100A serisi harçlardan elde edilen sonuçlar Bilim vd., (2013) ve Bakharev vd., (1999) tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile uyumludur. 100B serisi harçların  $f_c$  ve  $f_{fs}$  değerlerinde  $M_s$  modülü ile birlikte görülen artış eğilimi ise daha önce yapılmış başka bir çalışmada da rapor edilmiştir (Hardjito, 2005). Ayrıca, daha önce yapılan bazı çalışmalarda alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı malzemelerde YFC yerine UK ikamesiyle bağlayıcıların  $f_c$  değerlerinin azaldığı bildirilmiştir (Kumar vd., 2010; Aydın, 2013; Yazdi vd., 2018; Ling vd., 2019). Bu çalışmada ise alkali ile aktive edilmiş harçlarda YFC yerine UK kullanılması ile harçların  $f_c$  değerlerinde  $M_s$  modülü değerine göre farklı değişimler görülmüştür.  $M_s$  değeri 1 ve 1.25 iken UK içeriği ile birlikte harçların  $f_c$  değerleri artarken,  $M_s$  değeri 0.75 ve daha az iken UK içeriği ile  $f_c$  değerleri azalmıştır. Bu durum daha önce yapılan bir çalışmada optimum  $M_s$  değerinden daha düşük  $M_s$  modülü ile üretilen UK esaslı alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılarda jeopolimerizasyon için gerekli olan yeterli Si içeriğinin bulunmaması ve optimum  $M_s$  değerinden daha yüksek  $M_s$  modülü ile üretilen bağlayıcılarda ise Na içeriğinin azalması ile jeopolimerizasyon için gerekli yüksek Ph ortamının elde edilememesi olarak açıklanmıştır (Soutsos vd., 2016). Benzer şekilde, NaOH ile aktive edilen YFC esaslı harçların (düşük  $M_s$ ) sodyum silikat ile aktive edilenlere göre (yüksek  $M_s$ ) yüksek yapısal düzene, düşük polarizasyona ve yüksek Ca/Si oranına sahip olduğu rapor edilmiştir (Puertas vd., 2002; Escalante-Garcia vd., 2003). Sonuç olarak,  $M_s$  modülü değerinin YFC ve UK malzemelerinin ayrı ayrı veya birlikte kullanıldığı alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisinin olduğu söylenebilir.

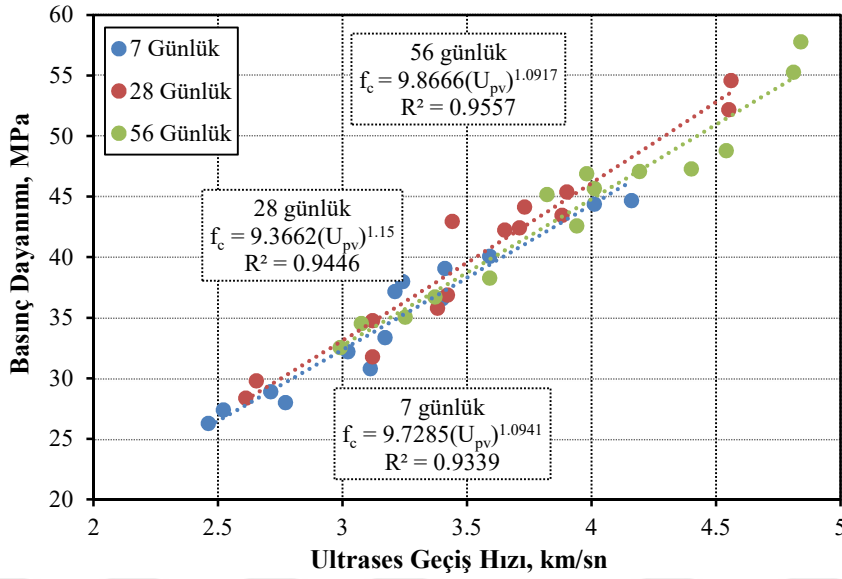
### **5.1.5 Harçların özellikleri arasındaki ilişkiler**

Deneysel çalışmadan elde edilen alkali ile aktive edilmiş harçlar ile kontrol harçlarının  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri ve  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki ilişkiler aşağıdaki başlıklar altında detaylı bir şekilde incelenmiştir.



### 5.1.5.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

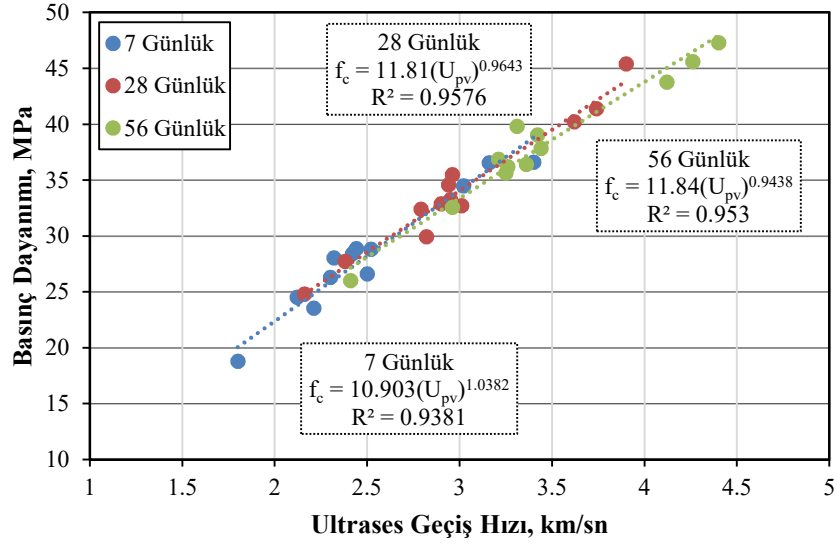
100A ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri Şekil 5.21’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu şekil incelendiğinde; 100A serisi harçların 7 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında oldukça yüksek bir ilişki görülürken, bu yüksek ilişkiyi gösteren  $R^2$  değerleri 28 ve 56 günde daha da artmıştır.



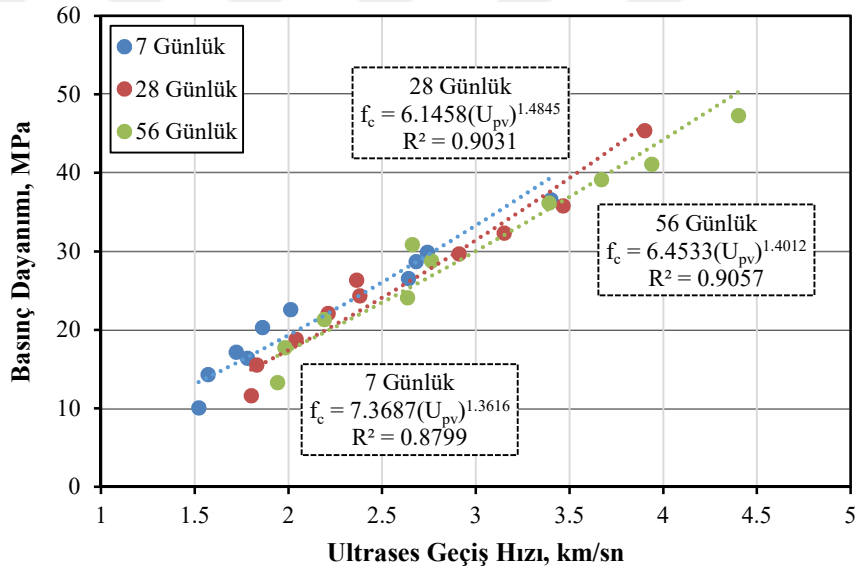
Şekil 5.21. 100A serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi

75A25B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri Şekil 5.22’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. 75A25B serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında oldukça yüksek bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, 100A serisi harçlardan farklı olarak 28 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişkinin bu seride biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.

50A50B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri Şekil 5.23’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu seride de, harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon görülmüştür. Ancak, 7, 28 ve 56 günlük  $R^2$  değerleri bu seride 100A ve 75A25B serisi karışımlara göre daha düşük elde edilmiştir. Bununla birlikte, 100A ve 75A25B serisi karışımlara olduğu gibi 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki korelasyonun 7 günlük değerlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

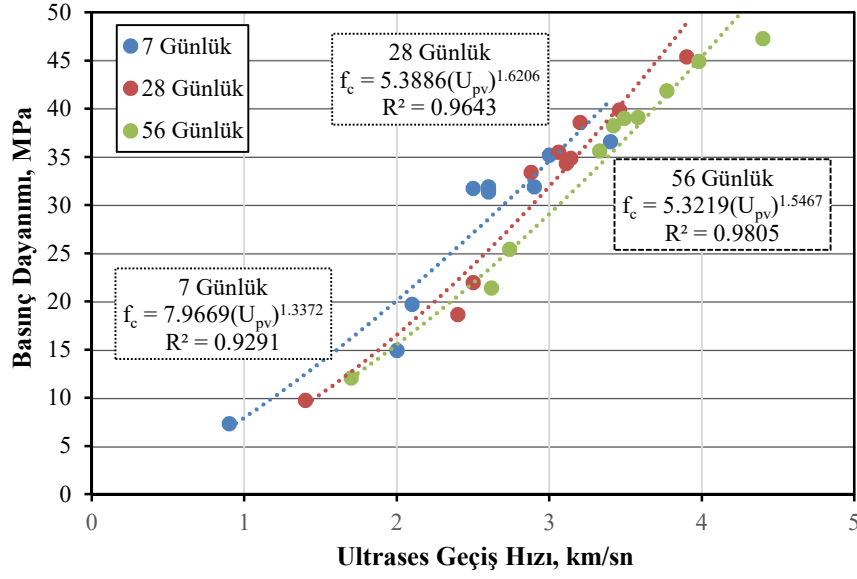


Şekil 5.22. 75A25B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi



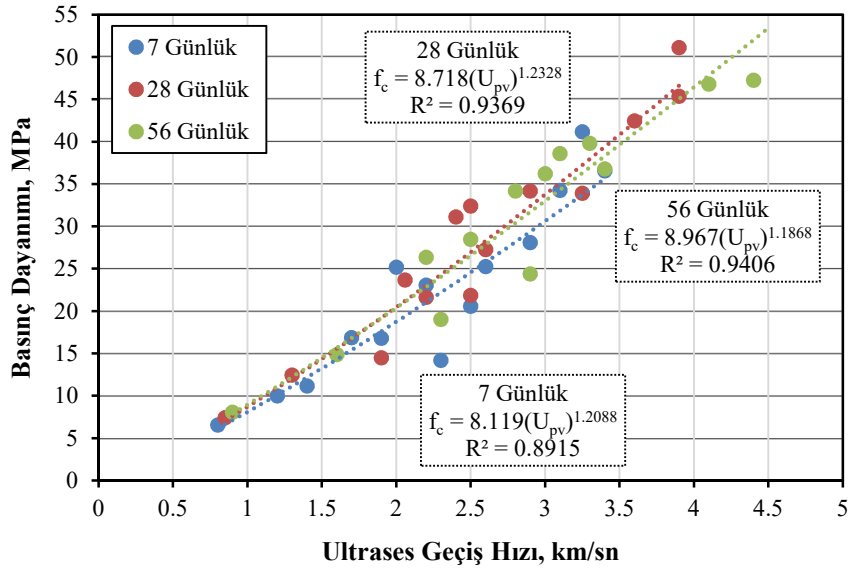
Şekil 5.23. 50A50B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi

25A75B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri Şekil 5.24'de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde, bu serideki harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu, bu yüksek korelasyonun artan kür yaşı ile birlikte daha da yükseldiği görülmüştür. Ayrıca, bu serideki harçların 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişkinin diğer tüm serilere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durumu şekil üzerinde verilen  $R^2$  değerleri ve korelasyon çizgileri doğrulamaktadır.



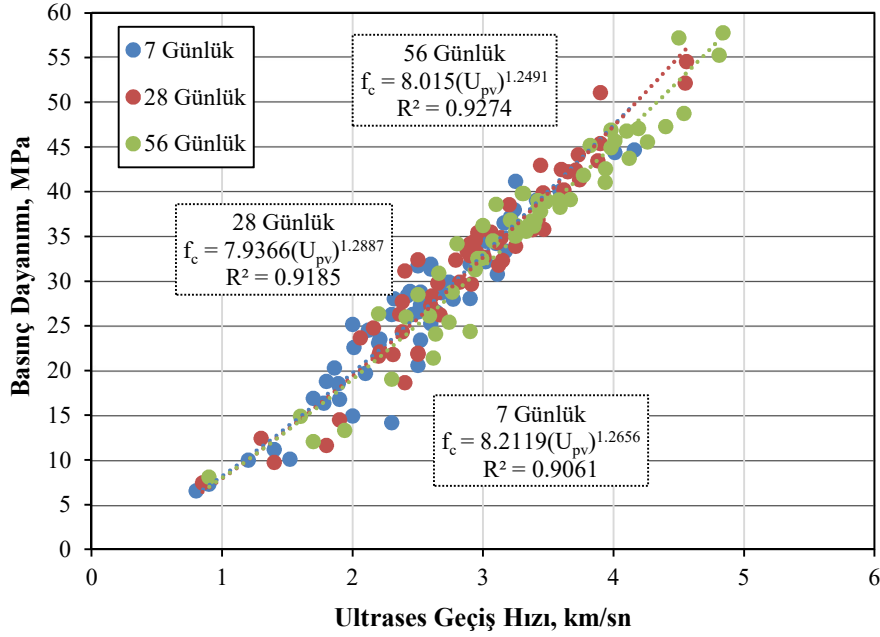
Şekil 5.24. 25A75B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi

100B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri Şekil 5.25’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu seride de diğer serilerde olduğu gibi harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında yüksek bir ilişki görülmüştür. Bununla birlikte, diğer serilerden farklı olarak bu serideki 7 günlük harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren parametrelerden olan  $R^2$  değerlerinin, 28 ve 56 günlük  $R^2$  değerlerine göre biraz daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5.25. 100B serisi harçların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi

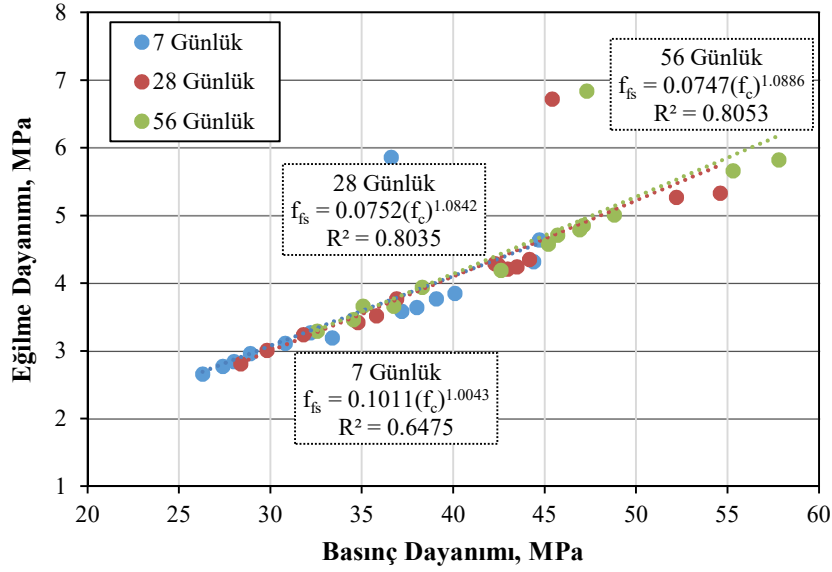
Bu çalışmada üretilen tüm harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.26'da verilmiştir. Şekil 5. 26 incelendiğinde, harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bu durumu şekil üzerinde verilen korelasyon çizgileri ve  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.  $R^2$  değerlerinin 1'e yakın olması harçların  $f_c$  ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişkinin yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.26. Harçların basınç dayanımı ile ultras ses geçiş hızı ilişkisi

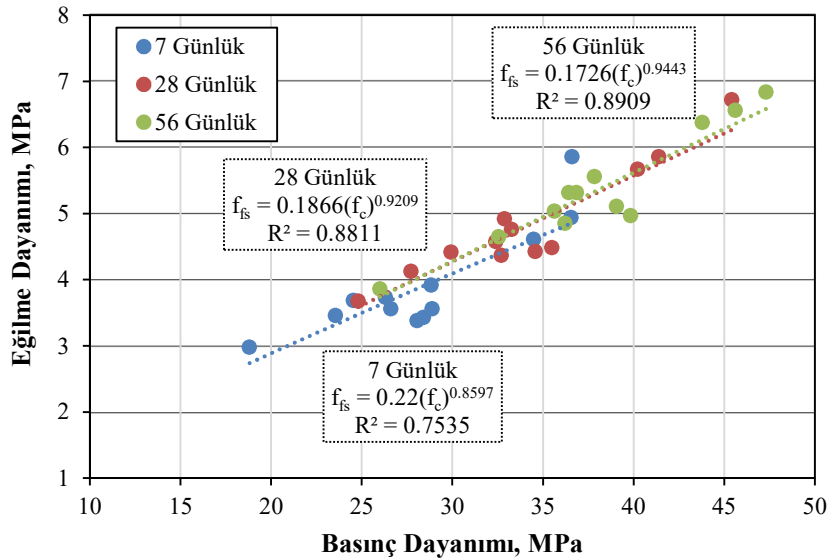
### 5.1.5.2 Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

100A ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri Şekil 5.27'de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu şekil incelendiğinde,  $R^2$  değerleri ve eğilim çizgileri 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir ilişkinin olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranının kontrol serisine göre düşük olduğu görülmüştür. Kontrol serisinden daha yüksek  $f_c$  değerleri elde edilen karışımlarda dahi kontrol serisine göre daha düşük  $f_{fs}$  değerleri görülmüştür. Bu durum  $R^2$  değerlerinin daha yüksek olmasını engellemiştir. Ayrıca, 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun 28 ve 56 günlük harçlarda birbirlerine çok yakın olduğu ve 7 günlük harçların değerleri arasındaki korelasyondan daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



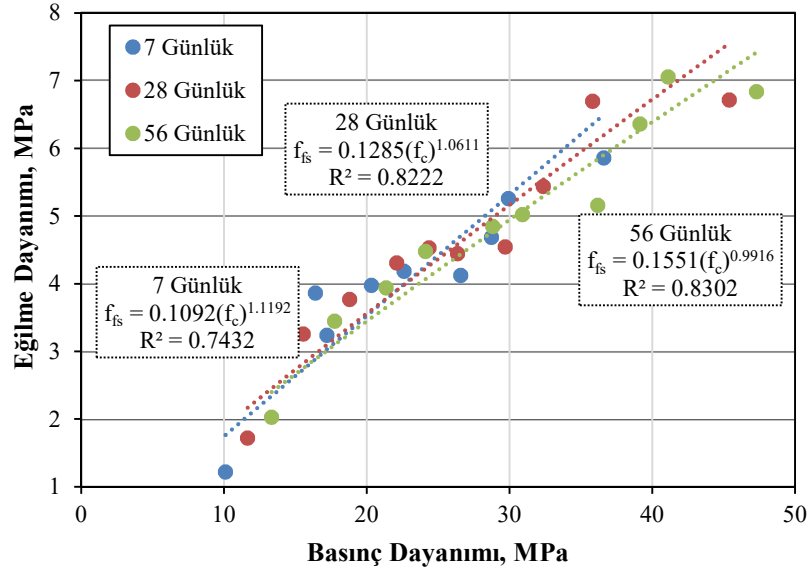
Şekil 5.27. 100A serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi

75A25B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri Şekil 5.28’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon gözlenmiştir. UK içeriği ile birlikte 100A serisine göre 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine olan oranının artması ve bu oranın kontrol serisine yaklaşması  $R^2$  değerlerini de artırmıştır. 28 ve 56 günlük 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyon, 100A serisi harçlarda olduğu gibi 7 günlük harçlardaki korelasyondan daha yüksek elde edilmiştir.



Şekil 5.28. 75A25B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi

50A50B ve kontrol serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri Şekil 5.29’da görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.29 incelendiğinde, 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun 100A ve 75A25B harçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 28 ve 56 günlük 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyon birbirlerine benzer iken, 7 günlük harçların değerleri arasındaki korelasyon 28 ve 56 günlük harçlardan daha düşük olmuştur.

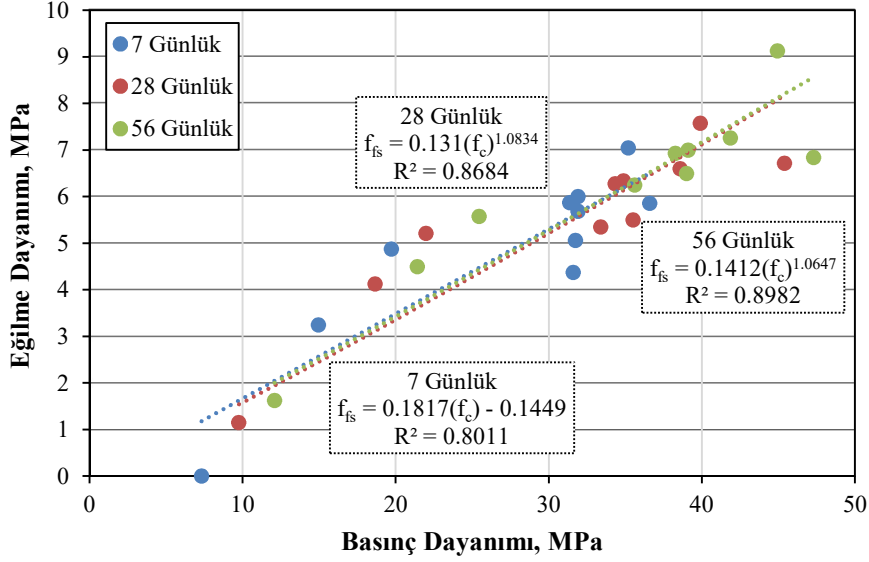


Şekil 5.29. 50A50B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi

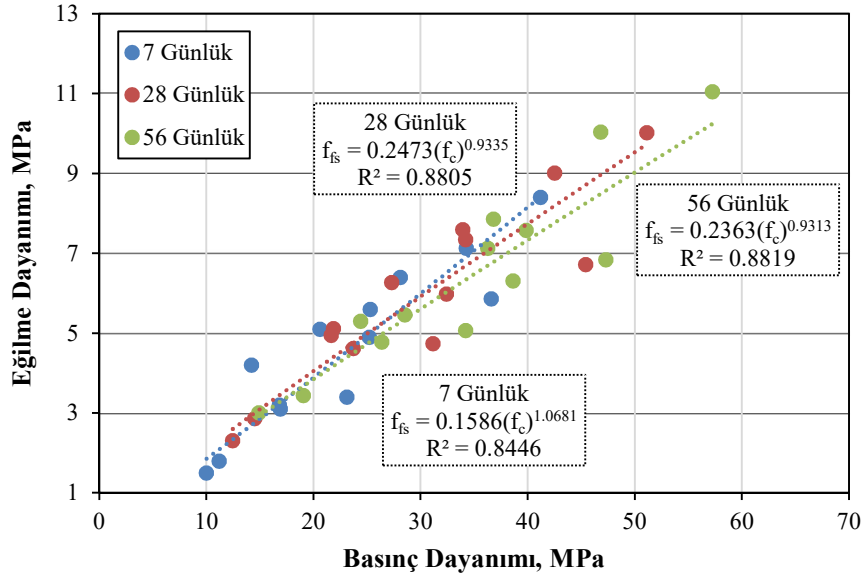
25A75B ile kontrol serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.30’da verilmiştir. 25A75B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, diğer serilerde 56 günlük harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyon 28 günlük harçlara benzer iken, bu seride 56 günlük harçların  $R^2$  değerlerinin 28 günlük harçların  $R^2$  değerlerine oranının daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

100B ve kontrol serisi harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri Şekil 5.31’de görüldüğü gibi ilişkilendirilmiştir. Bu serideki harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasında yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş harçların 7 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki en yüksek korelasyon 100B serisi harçlarda gözlenmiştir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş harçların 7 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun harçlardaki UK

içeriği ile birlikte genellikle yükseldiği gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun artan kür yaşı ile birlikte genellikle yükseldiği görülmüştür.



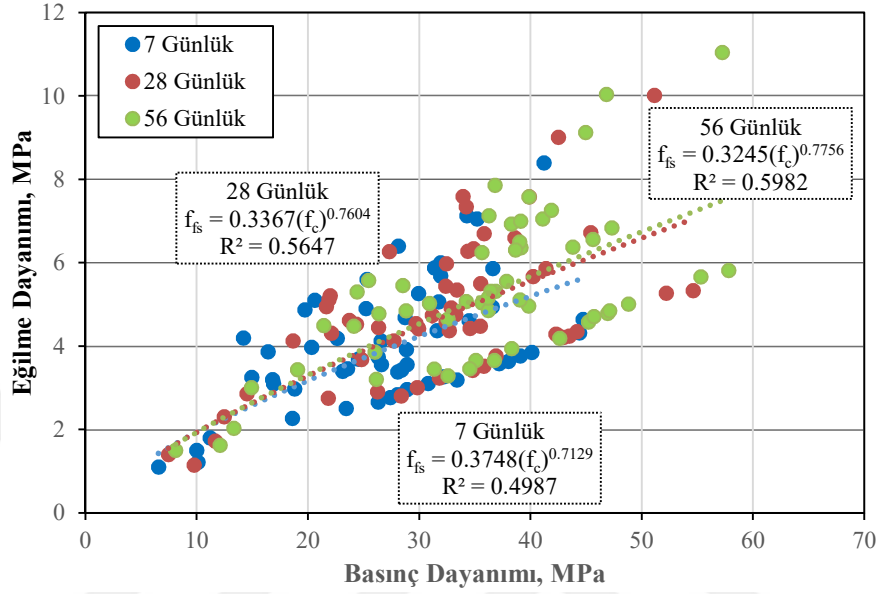
Şekil 5.30. 25A75B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 5.31. 100B serisi harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi

Bu çalışmada üretilen tüm harçların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.32’de verilmiştir. Şekil 5.32 incelendiğinde, harçların tamamının  $f_{fs}$  ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun, her bir serideki harçların değerleri arasındaki korelasyona göre oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak

harçlardaki UK içeriğinin artması ile harçların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranının artması ve harçlardaki YFC içeriğinin artması ile harçların 7 günlük  $f_{fs}$  ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun düşmesi olarak gösterilebilir. Bununla birlikte, harçların  $f_{fs}$  ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyonun kür yaşı ile birlikte yükseldiği gözlenmiştir.

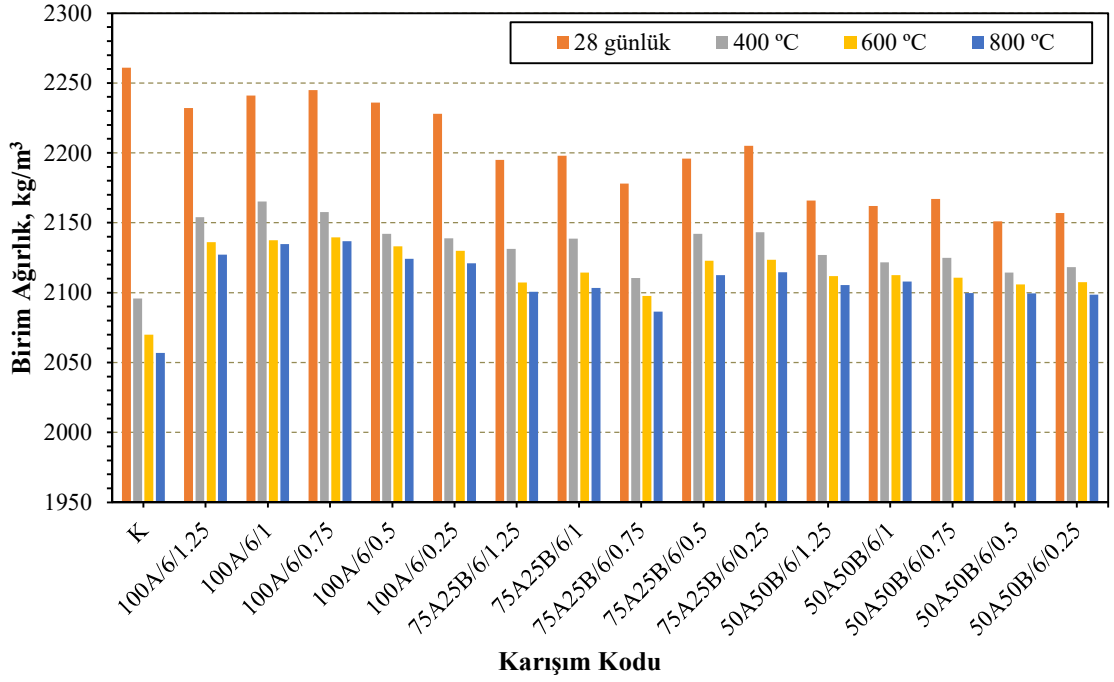


Şekil 5.32. Harçların eğilme dayanımı ile basınç dayanımı ilişkisi

### 5.1.7 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık

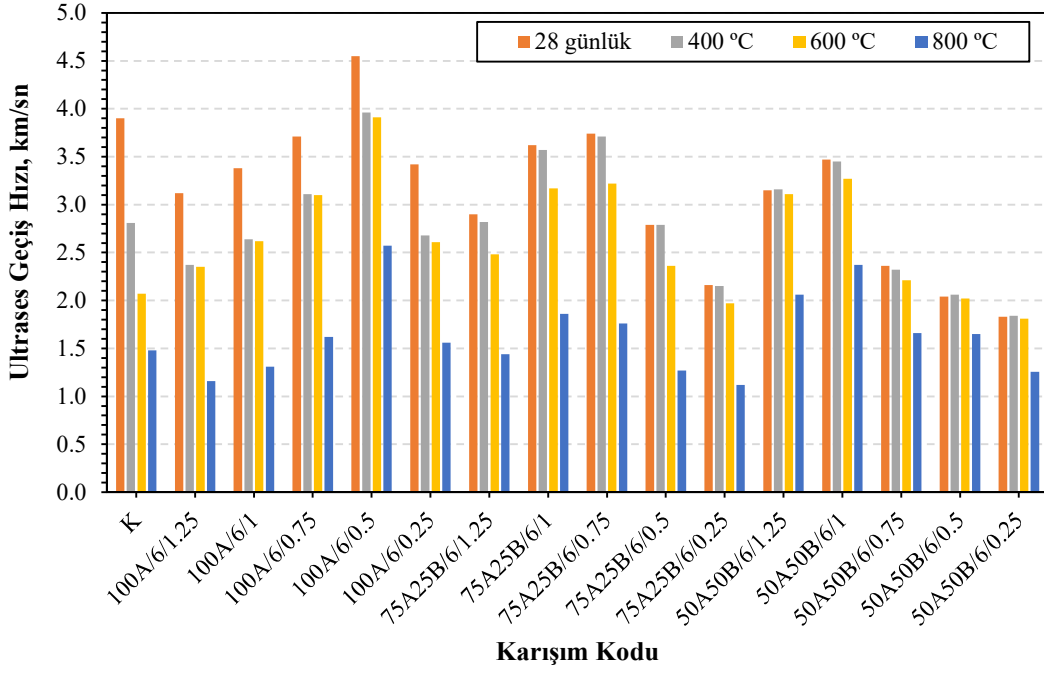
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol harçları ile birlikte %6 Na içeren 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçların birim ağırlıklarında meydana gelen değişimler Şekil 5.33’de sunulmuştur. Harçların birim ağırlıkları sıcaklık arttıkça azalmıştır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol harçlarının birim ağırlıklarında meydana gelen kayıplar alkali ile aktive edilmiş harçlara göre daha fazla olmuştur. Bunun nedeni olarak kontrol harçlarıyla alkali ile aktive edilmiş harçların farklı kür koşullarında bekletilmesi gösterilebilir. Sıcaklık 800 °C’ye ulaştığında kontrol harçlarının birim ağırlıklarında %9 seviyesinde azalma görülürken, 100A serisi harçlarda ortalama %5, 75A25B serisi harçlarda ortalama %4 ve 50A50B serisi harçlarda ise ortalama %3 seviyelerinde azalmalar gözlenmiştir. Böylece, yüksek sıcaklık etkisinde alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlıklarında meydana gelen kayıpların harçlardaki UK içeriği ile birlikte azaldığı görülmüştür.





**Şekil 5.33.** Yüksek sıcaklığın harçların birim ağırlıklarına etkisi

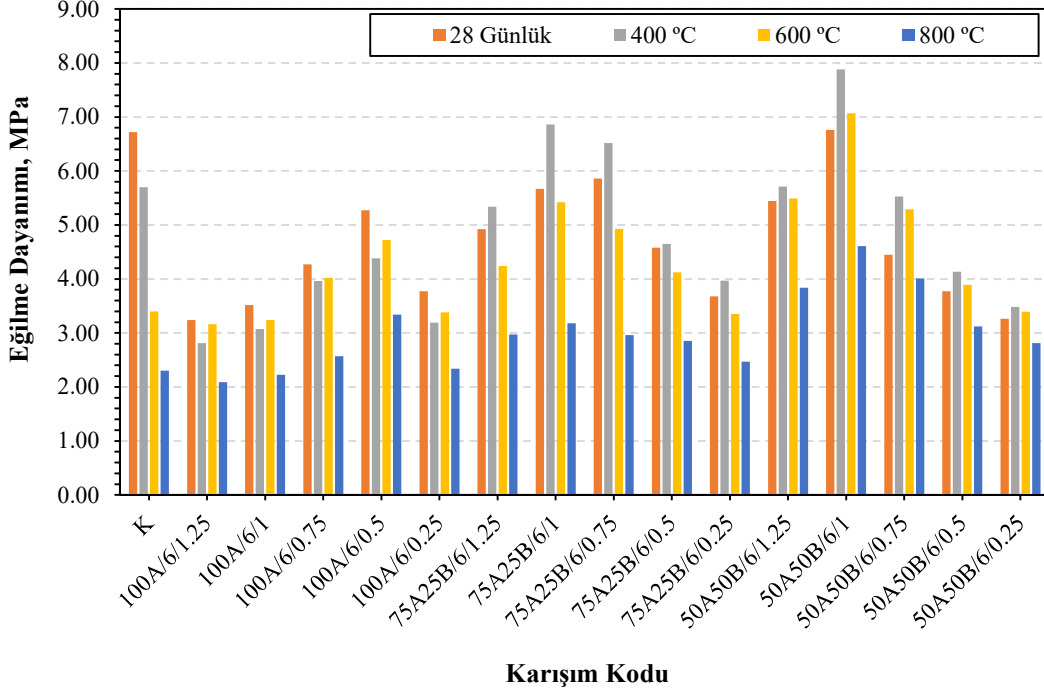
Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harçların  $U_{pv}$  değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 5.34'te verilmiştir. Kontrol harçlarının  $U_{pv}$  değerleri deney öncesine göre 400 °C de %28, 600 °C de %47 ve 800 °C de %62 oranlarında azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisiyle alkali ile aktive edilmiş harçların  $U_{pv}$  değerlerinde meydana gelen değişimler üzerine Ms modülünün belirgin bir etkisi olmamıştır. 100A serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri 400 °C de %24, 600 °C de %25 ve 800 °C de %62 oranlarında azalmıştır. Bununla birlikte, 400 °C ye maruz bırakılan 75A25B serisi harçların  $U_{pv}$  değerlerinde deney öncesine göre önemli bir değişim görülmemiştir. 75A25B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri 600 °C'de deney öncesine göre %15 azalırken, asıl önemli kayıplar 600 °C den sonra meydana gelmiştir. 400 °C ye maruz bırakılan 50A50B serisi harçların  $U_{pv}$  değerlerinde ise 75A25B serisi harçlarda olduğu gibi deney öncesine göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. 50A50B serisi harçların  $U_{pv}$  değerleri 600 °C de %6 ve 800 °C de %34 oranlarında azalmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde, en fazla  $U_{pv}$  değer kaybı kontrol harçlarında görülmüştür. UK içeriği arttıkça alkali ile aktive edilmiş harçların  $U_{pv}$  değerlerinde meydana gelen kayıplar azalmıştır.



Şekil 5.34. Yüksek sıcaklığın harçların ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kontrol harçları ile birlikte %6 Na içeren 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 5.35’de verilmiştir. Kontrol harçlarının  $f_{fs}$  değerleri deney öncesine göre 400 °C de %15, 600 °C de %49 ve 800 °C de %65 oranlarında azalmıştır. Kontrol harçlarının  $f_{fs}$  değerleri sıcaklık arttıkça azalırken, benzer değişim alkali ile aktive edilmiş harçlarda gözlenmemiştir. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_{fs}$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen değişimler üzerinde bağlayıcı malzeme içeriği etkili olurken, Ms modülünün belirgin bir etkisi olmamıştır. 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri 400 °C de %16 oranında azalırken, sıcaklık 600 °C ye çıktığında ise bu harçlarının  $f_{fs}$  değerleri azalmaya devam etmemiştir. 100A serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri 800 °C de deney öncesine göre %39 oranında azalmıştır. 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri 400 °C de deney öncesine göre %1 ile %20 oranları arasında artmıştır. 600 °C ve 800 °C de ise 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri deney öncesine göre sırasıyla ortalama olarak %15 ve %49 oranlarında azalmıştır. 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri 400 °C de deney öncesine göre %5 ile %24 oranları arasında, 600 °C de ise %18’e varan oranlarda artmıştır. Sıcaklık 800 °C ye çıktığında ise 50A50B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri deney öncesine göre ortalama olarak %31 oranında azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan harçların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler Şekil 5.36’da verilmiştir. Kontrol harçlarının  $f_c$  değerleri sıcaklık artışı ile birlikte azalmış, 800 °C de %66 seviyesine

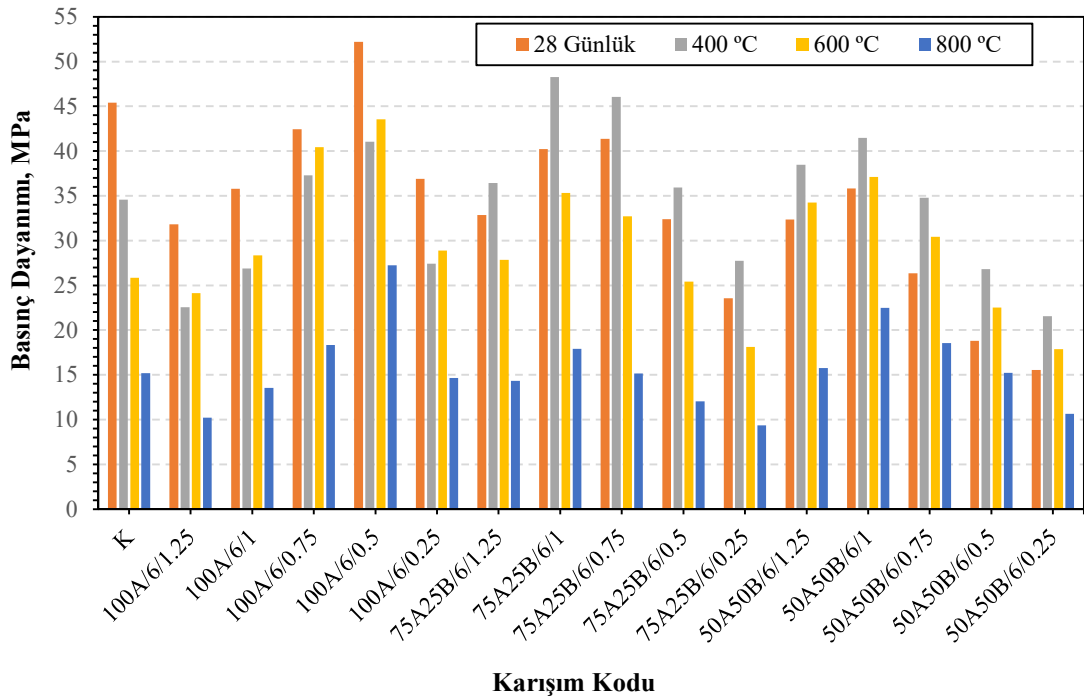
ulaşmıştır. 100A serisi harçların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre 400 °C de %12 ile %49 arasında azalırken, sıcaklık 400 °C den 600 °C ye çıktığında  $f_c$  kayıplarındaki artış devam etmemiştir. Bu harçların  $f_c$  değerlerindeki önemli derecedeki kayıplar ise 800 °C de görülmüştür.



**Şekil 5.35.** Yüksek sıcaklığın harçların eğilme dayanımlarına etkisi

Yüksek sıcaklık etkisiyle 100A serisi harçların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler Türker vd. (2016) tarafından yapılmış çalışmada ortam sıcaklığında kür edilen harçlarda ve Nasr vd. (2018) tarafından yapılmış çalışmada %4 ve %6  $\text{Na}_2\text{O}$  ile üretilmiş ve ortam sıcaklığında kür edilmiş harçlarda gözlenmiştir. 75A25B serisi harçların  $f_c$  değerleri 400 °C de deney öncesine göre %10 ile %20 oranları arasında artmıştır. 400 °C den daha yüksek sıcaklıklarda ise 75A25B serisi harçların  $f_c$  değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. 75A25B serisi harçların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre 600 °C de ortalama olarak %23, 800 °C de ortalama olarak %63 oranlarında azalmıştır. 50A50B serisi harçların  $f_c$  değerleri 400 °C de deney öncesine göre %16 ile %42 oranları arasında artmıştır. Bu artışın nedeni olarak bu harçlardaki reaksiyona girmemiş olan UK parçacıklarının sıcaklığın 400 °C ye çıkması ile sinterleme reaksiyonu yapması olarak açıklanabilir (Pan vd., 2018; Zhang vd., 2016). Sıcaklık 600 °C ye çıktığında ise 50A50B serisi harçların  $f_c$  değerleri düşüş eğilimi gösterse de, deney öncesine göre daha yüksek  $f_c$

değerleri elde edilmiştir. 50A50B serisi harçların  $f_c$  değerlerinde kayıplar ancak sıcaklık 800 °C ye çıktığında gözlenmiştir. 50A50B serisi harçların  $f_c$  değerleri 800 °C de deney öncesine göre %19 ile %51 oranları arasında azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde en fazla  $f_c$  değer kaybı kontrol harçlarında görülmüştür. UK içeriği arttıkça alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen kayıplar azalmıştır. UK içeriği ile birlikte alkali ile aktive edilmiş harçların yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olmasının nedeni olarak bu harçlardaki N-A-S-H jelinin UK içeriği ile artması ve yüksek sıcaklığa daha dayanıksız olan C-A-S-H jelinin azalması gösterilebilir (Lee vd., 2017).



Şekil 5.36. Yüksek sıcaklığın harçların basınç dayanımlarına etkisi

### 5.1.6 Hafif beton üretimi için bağlayıcı fazının belirlenmesi

Çalışmada, kontrol harç serisi ile birlikte alkali ile aktive edilmiş harç serilerinin her birinden en iyi mekanik özelliklere sahip iki harç karışımının bağlayıcı fazı (bağlayıcı malzeme, su ve aktivatörler) hafif beton üretimi için seçilmiştir. 100A serisinden 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu, 75A25B serisinden 75A25B/6/1 ve 75A25B/6/0.75 kodlu, 50A50B serisinden 50A50B/6/1.25 ve 50A50B/6/1 kodlu, 25A75B serisinden 25A75B/6/1.25 ve 25A75B/6/1 kodlu, 100B serisinden ise 100B/6/1.5 ve 100B/8/1.25 kodlu karışımların bağlayıcı fazı hafif beton üretimi için seçilmiştir.

## 5.2 Beton Deneyleri

### 5.2.1 Çökme (slump) deneyi

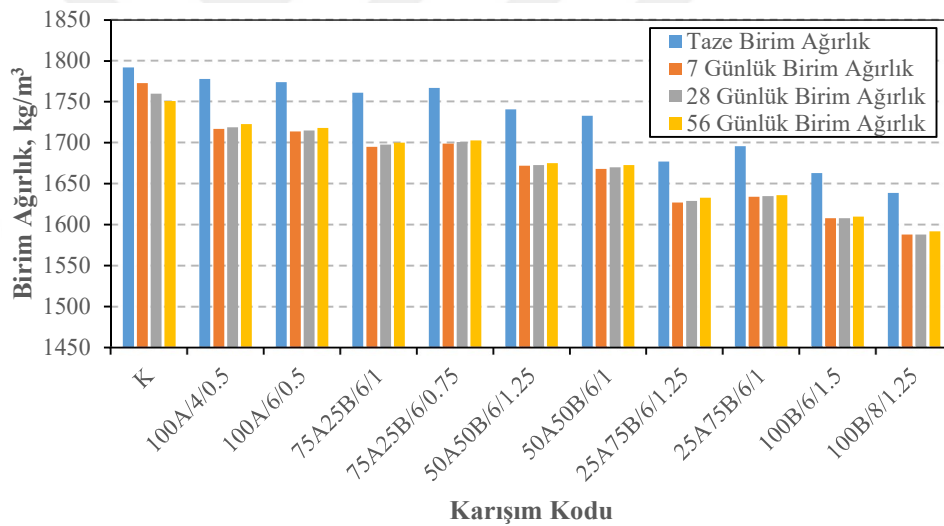
Bu çalışmada üretilen betonların çökme değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. 100A/4/0.5 kodlu betonlar hariç, alkali ile aktive edilmiş betonların çökme değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Geleneksel betonlarda Portland çimentosu yerine ağırlıkça belirli oranlarda UK veya YFC malzemelerinin ikamesi bu betonlardaki bağlayıcı hamur hacmini artırmakta ve betonların kıvamını genellikle artırmaktadır. Bunun nedeni olarak YFC ve UK malzemelerinin özgül ağırlıklarının çimentoya göre daha düşük olmasından dolayı aynı ağırlıkta daha fazla hacim kaplamaları gösterilebilir. Bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlarda da çimento kullanılmamış, YFC ve UK malzemeleri birlikte veya ayrı ayrı kullanılmıştır. Geleneksel betonda Portland çimentosu yerine UK veya YFC kullanılması ile benzer şekilde, alkali ile aktive edilmiş betonlarda bağlayıcı malzeme olarak YFC, UK veya YFC ile UK malzemelerinin birlikte kullanılması, alkali ile aktive edilmiş betonlardaki bağlayıcı jel hacmini kontrol betonlarına kıyasla artırmıştır. Ancak, alkali ile aktive edilmiş betonlarda kullanılan alkali aktivatörler bu betonların kıvamını olumsuz etkilemiştir. Bununla birlikte, bu çalışmada sadece 100A ve 100B serisi bağlayıcı malzeme içeren betonlar farklı Na konsantrasyonları ile üretilmiştir. Bu betonların çökme değerlerinin Na içeriği ile birlikte azaldığı görülmüştür. Ayrıca, Ms modülünün betonların çökme değerleri üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır.

**Çizelge 5.3.** Beton karışımlarının çökme ve taze birim ağırlık değerleri

Karışım Kodu	Çökme (cm)	Taze Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )
K	10.00	1792
100A/4/0.5	10.00	1778
100A/6/0.5	8.00	1774
75A25B/6/1	9.00	1761
75A25B/6/0.75	8.00	1767
50A50B/6/1.25	8.00	1741
50A50B/6/1	9.00	1733
25A75B/6/1.25	8.00	1677
25A75B/6/1	9.00	1696
100B/6/1.5	9.00	1663
100B/8/1.25	7.00	1639

## 5.2.2 Taze betonun birim ağırlığı

Deneysel çalışmada üretilen beton numunelerden elde edilen taze birim ağırlık değerleri Çizelge 5.3 ve Şekil 5.37’de sunulmuştur. Taze beton karışımlarının ölçülen birim ağırlık değerleri  $1639.42 \text{ kg/m}^3$  ile  $1792.05 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmiştir. Alkali ile aktive edilmiş tüm karışımların taze birim ağırlık değerlerinin kontrol karışımına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak YFC ve UK malzemelerinin özgül ağırlıklarının kontrol karışımında kullanılan çimentoya göre daha düşük olmasıdır. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş hafif beton karışımlarında UK içeriğinin artması ile birlikte taze birim ağırlık değerleri azalmıştır. Hafif beton karışımlarında en yüksek taze birim ağırlık kontrol karışımında, en düşük birim ağırlık ise 100B/8/1.25 kodlu karışımda gözlenmiştir. 100B/8/1.25 kodlu karışımın taze birim ağırlığı, kontrol karışımından yaklaşık %8.5 oranında daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.37. Betonların taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları

## 5.2.3 Sertleşmiş birim ağırlık ve su emme

Bu deneysel çalışmada üretilen tüm hafif betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri Çizelge 5.4 ve Şekil 5.37’de verilmiştir. Bu çizelge ve şekil incelendiğinde, alkali ile aktive edilmiş betonların sertleşmiş birim ağırlıklarının kontrol betonlarına göre %10’a varan oranlarda daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş hafif betonların 7, 28 ve 56 günlük sertleşmiş birim ağırlık değerleri UK içeriği ile birlikte genellikle azalmıştır. Kontrol betonları ile alkali

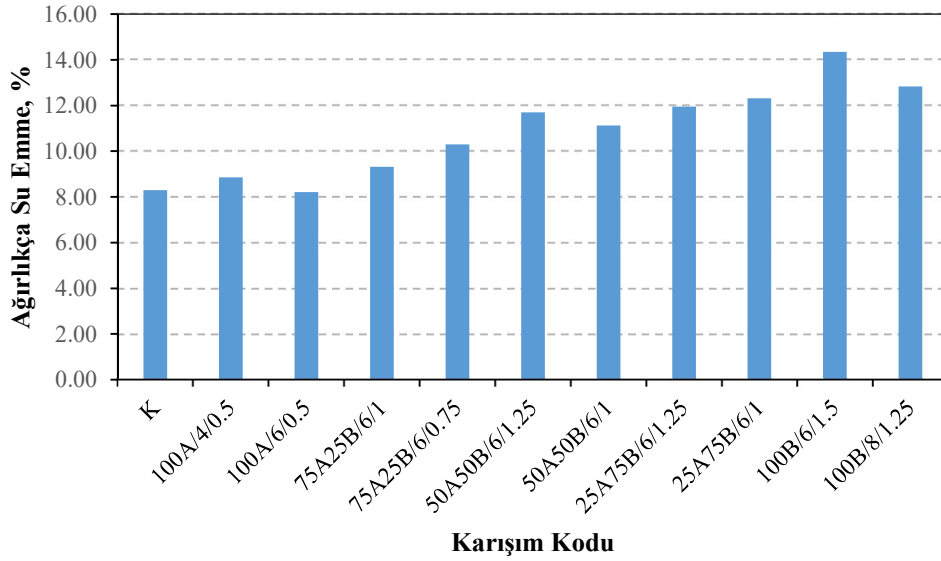
ile aktive edilmiş betonların sertleşmiş birim ağırlıkları kür yaşına göre farklı eğilim göstermiştir. Kontrol betonlarının sertleşmiş birim ağırlıkları kür yaşına göre %1.25'e varan oranda azalma görülürken, alkali ile aktive edilmiş betonların birim ağırlıklarında kür yaşının önemli bir etkisi olmamıştır. Bunun nedeni kontrol betonları ile alkali ile aktive edilen betonların farklı kür ortamlarında bekletilmesidir. Standart kür koşullarında kür havuzunda bekletilen kontrol betonlarının sertleşmiş birim ağırlıklarında meydana gelen azalmanın nedeni bu betonlarda meydana gelen  $\text{Ca(OH)}_2$  içeriğinin su kürü nedeniyle çözülmesi ve beton bünyesini terk etmesidir. Alkali ile aktive edilmiş betonlar ise 80 °C de 48 saat boyunca etüvde bekletildikten sonra deney gününe kadar laboratuvar koşulunda bekletildiği için kür yaşı ile birlikte havadaki nemin betonlara nüfuzu nedeniyle bu betonların birim ağırlıklarında sadece birkaç g artış meydana gelmiştir. Ayrıca, bu çalışmada üretilen betonların sertleşmiş birim ağırlıkları 2000 kg/m<sup>3</sup> den düşük olduğu için TS EN 206:2013+A1 standardına göre hafif beton sınıfına girmektedir.

**Çizelge 5.4.** Betonların sertleşmiş birim ağırlık ve su emme değerleri

Karışım Kodu	7 Günlük Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	28 Günlük Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	56 Günlük Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Su Emme (%)
K	1773	1760	1751	8.30
100A/4/0.5	1717	1719	1723	8.86
100A/6/0.5	1714	1715	1718	8.21
75A25B/6/1	1695	1698	1700	9.32
75A25B/6/0.75	1699	1701	1703	10.30
50A50B/6/1.25	1672	1673	1675	11.70
50A50B/6/1	1668	1670	1673	11.13
25A75B/6/1.25	1627	1629	1633	11.96
25A75B/6/1	1634	1635	1636	12.32
100B/6/1.5	1608	1608	1610	14.35
100B/8/1.25	1588	1588	1592	12.84

Bu deneysel çalışmada üretilen hafif betonların ağırlıkça yüzde su emme değerleri Çizelge 5.4 ve Şekil 5.38'de verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, 100A/6/0.5 kodlu betonlar hariç tüm alkali ile aktive edilmiş betonların su emme değerlerinin kontrol betonlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, karışımlardaki UK içeriğinin artışı, betonların su emme kapasitelerini genellikle artırmıştır. Bu durumun nedeni olarak da UK malzemesinin alkali ile aktive edilmesi sonucu oluşan jel yapılarının

YFC malzemesinin aktive edilmesiyle elde edilen jel yapılarına göre daha boşluklu bir yapıya sahip olması gösterilebilir. Daha önce yapılmış deneysel bir çalışmada, alkali ile aktive edilmiş UK esaslı bağlayıcılarda UK yerine ağırlıkça %50 YFC ikamesi, bağlayıcılardaki toplam boşluk hacminin azaldığı belirtilmiştir (Provis vd., 2012). Başka bir çalışmada ise UK malzemesinin alkaliler ile aktive edilmesi sonucu oluşan bağlayıcı jel olan N-A-S-H jelinin YFC malzemesinin aktive edilmesi sonucunda oluşan C-A-S-H jeline kıyasla daha boşluklu bir yapıya sahip olduğu bildirilmiştir (Ismail vd., 2014).



Şekil 5.38. Betonların ağırlıkça yüzde su emme değerleri

#### 5.2.4 Kılcal su emme

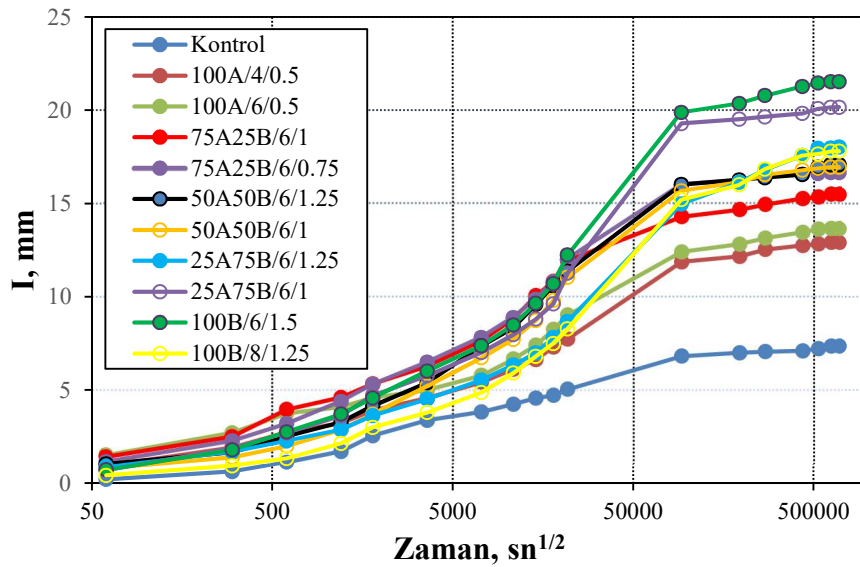
Betonların zamana bağlı kılcal su emme (I, mm) değerleri Çizelge 5.5 ve Şekil 5.39'da verilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonların tamamının tüm zamanlarda kontrol betonuna göre daha fazla kılcal yolla su emdiği görülmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş betonların kısa zamanda oldukça hızlı bir şekilde su emdiği gözlenmiştir. Öyle ki; 6 saat sonunda alkali ile aktive edilmiş betonların kılcal su emme seviyeleri 7.74 mm ile 12.24 mm arasında değişirken, kontrol betonlarının su emme seviyeleri 5.05 mm olmuştur. Alkali ile aktive edilmiş betonların kılcal yolla su emme hızları her ne kadar zamana bağlı olarak azalsa da, 8 günün sonunda bu betonların kılcal su emme seviyelerinin 12.9 mm ile 21.54 mm arasında olduğu görülmüştür. 8 günün sonunda kontrol betonlarının kılcal yolla su emme seviyeleri ise 7.35 mm de kalmıştır. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriği arttıkça genellikle kılcal yolla emilen su



miktarının da arttığı gözlenmiştir. 100A/4/0.5 kodlu betonların 8 günde kılcal yolla emdikleri suyun seviyesi 12.90 mm iken, bu seviye 100B/6/1.5 kodlu betonlarda 21.54 mm olmuştur.

**Çizelge 5.5.** Betonların zamana bağlı kılcal su emme değerleri

Karışım Zaman	K	100A/ 4/0.5	100A/ 6/0.5	75A25B/ 6/1	75A25B/ 6/0.75	50A50B/ 6/1.25	50A50B/ 6/1	25A75B/ 6/1.25	25A75B/ 6/1	100B/ 6/1.5	100B/ 8/1.25
	Zamana bağlı kılcal su emme, I (mm)										
1 dk.	0.21	0.96	1.53	1.44	1.16	1.03	0.81	0.88	0.70	0.72	0.42
5 dk.	0.63	1.94	2.72	2.52	2.28	1.66	1.39	1.69	1.88	1.80	0.94
10 dk.	1.14	2.74	3.76	3.97	3.20	2.52	1.99	2.28	2.71	2.76	1.33
20 dk.	1.73	3.25	4.11	4.61	4.39	3.28	2.86	2.89	3.62	3.71	2.14
30 dk.	2.57	3.91	4.60	5.33	5.31	4.15	3.7	3.63	4.71	4.58	3.00
1 saat	3.39	4.58	5.01	6.28	6.49	5.39	5.21	4.52	5.77	6.02	3.80
2 saat	3.84	5.43	5.79	7.64	7.82	7.37	6.73	5.54	7.02	7.38	4.87
3 saat	4.25	6.12	6.66	8.82	8.89	8.34	7.72	6.34	7.97	8.49	5.91
4 saat	4.58	6.64	7.41	10.05	9.87	9.59	8.73	6.99	8.81	9.65	6.81
5 saat	4.72	7.31	8.24	10.81	10.80	10.59	9.81	7.82	9.62	10.71	7.50
6 saat	5.05	7.74	9.02	11.93	12.01	11.38	11.04	8.68	11.27	12.24	8.28
1 gün	6.82	11.86	12.39	14.27	15.98	16.02	15.69	14.98	19.29	19.89	15.21
2 gün	7.00	12.15	12.80	14.65	16.21	16.27	16.15	16.14	19.52	20.37	16.00
3 gün	7.06	12.52	13.13	14.92	16.42	16.39	16.55	16.82	19.65	20.79	16.85
5 gün	7.10	12.73	13.44	15.24	16.57	16.55	16.79	17.58	19.83	21.28	17.58
6 gün	7.22	12.81	13.61	15.32	16.61	16.96	16.90	17.96	20.09	21.46	17.66
7 gün	7.35	12.90	13.64	15.48	16.66	17.09	16.95	17.99	20.17	21.54	17.81
8 gün	7.35	12.90	13.64	15.48	16.66	17.09	16.95	18.04	20.17	21.54	17.81



**Şekil 5.39.** Betonların zamanın kareköküne bağlı kılcal su emme değerleri

Betonların birincil su emme katsayıları ilk 6 saat boyunca emdikleri suyun seviyesi dikkate alınarak, ikincil su emme katsayıları da 1. günden itibaren 8 gün boyunca emdikleri suyun seviyesine göre belirlenmiş ve belirlenen bu su emme katsayıları Çizelge 5.6'da sunulmuştur. Kontrol betonlarının birincil ve ikincil su emme katsayılarının alkali ile aktive edilmiş betonlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş betonlarda en yüksek birincil su emme katsayısı 100B/6/1.5 kodlu betonlarda gözlenirken, en yüksek ikincil su emme katsayısı 25A75B/6/1.25 kodlu betonlardan elde edilmiştir. Ayrıca, en düşük birincil su emme katsayısı 100A/4/0.5 kodlu betonlarda, en düşük ikincil su emme katsayısı 75A25B/6/0.75 kodlu betonlarda görülmüştür. Kontrol betonları da dahil olmak üzere, üretilen betonların ikincil kılcal su emme katsayılarının oldukça düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak betonların 1. günün sonunda kılcal yolla emebildikleri suyun neredeyse tamamını emmiş olmaları, daha sonraki günlerde de ağırlıklarında çok az değişiklik olması gösterilebilir. Öyle ki, 25A75B/6/1.25 kodlu betonlar hariç diğer tüm betonların son iki günde ağırlıklarının neredeyse hiç değişmediği görülmüştür.

**Çizelge 5.6.** Betonların birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları

Karışım Kodu	Birincil Kılcal Su Emme Katsayısı (mm/s <sup>1/2</sup> )	İkincil Kılcal Su Emme Katsayısı (mm/s <sup>1/2</sup> )
K	0.0338	0.00097
100A/4/0.5	0.0444	0.00202
100A/6/0.5	0.0460	0.00245
75A25B/6/1	0.0690	0.00233
75A25B/6/0.75	0.0713	0.00130
50A50B/6/1.25	0.0742	0.00215
50A50B/6/1	0.0716	0.00239
25A75B/6/1.25	0.0521	0.00583
25A75B/6/1	0.0678	0.00176
100B/6/1.5	0.0761	0.00329
100B/8/1.25	0.0554	0.00509

### 5.2.5 Ultrases geçiş hızı

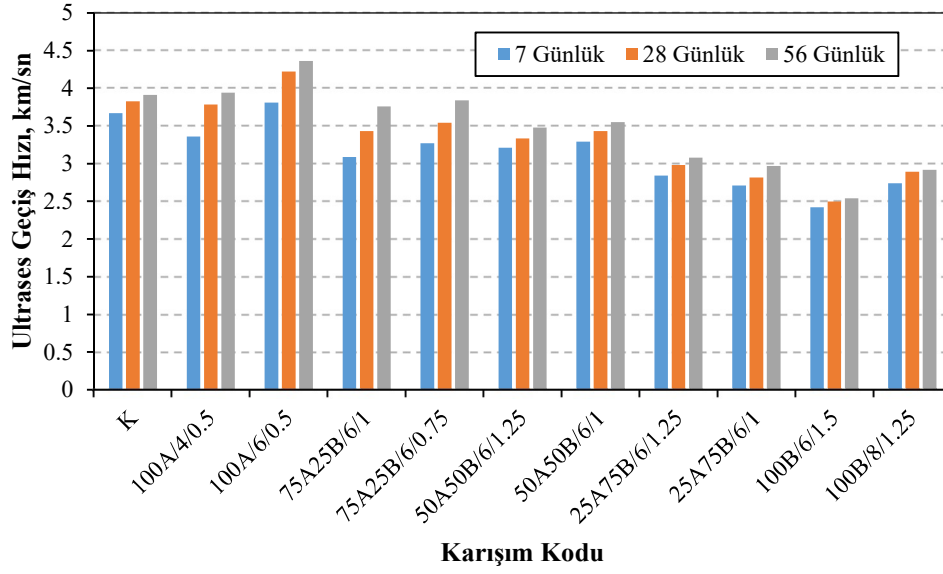
Üretilen hafif betonların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerleri Çizelge 5.7 ile Şekil 5.40'da verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu betonlar

hariç alkali ile aktive edilmiş betonların  $U_{pv}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte alkali ile aktive edilmiş betonlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 100A/6/0.5 kodlu betonlarda, en düşük  $U_{pv}$  değerleri ise 100B/6/1.5 kodlu betonlarda görülmüştür. Ayrıca, karışımlardaki UK içeriği betonların 7, 28 ve 56 günlük  $U_{pv}$  değerlerini genellikle azaltmıştır. Benzer sonuçlar daha önce yapılan bir çalışmada da ortaya konulmuştur. Kar vd. (2013) yaptıkları çalışmada YFC ve UK malzemelerini alkali ile aktive ederek ürettikleri betonların  $U_{pv}$  değerlerinin UK içeriği ile birlikte azaldığını bildirmişlerdir. Bunun nedeni olarak UK içeriği ile birlikte alkali ile aktive edilmiş betonlardaki artan boşluk hacmi gösterilebilir (Lloyd vd., 2009; Luna-Galiano vd., 2016). Ayrıca, bu çalışmada üretilen betonların tamamının  $U_{pv}$  değerlerinin artan kür yaşı ile birlikte arttığı görülmüştür.

Kontrol betonlarının  $U_{pv}$  değerleri zamana bağlı olarak %6'ya ulaşan oranda artarken, alkali ile aktive edilmiş betonların  $U_{pv}$  değerleri zamanla %5 ile %21 arasında değişen oranlarda artmıştır. Alkali ile aktive edilmiş betonlardaki YFC içeriği arttıkça betonların  $U_{pv}$  değerlerindeki zamana bağlı artışın genellikle daha fazla olduğu görülmüştür. Buna ek olarak,  $U_{pv}$  değerlerine göre harç ve betonlar pratikte Çizelge 5.2'ye göre değerlendirilebilmektedir. Çizelge 5.2'ye göre bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş betonların "zayıf" ve "iyi" arasında değişen kaliteye sahip oldukları söylenebilir. Kontrol betonlarının ise 'iyi' kaliteye sahip olduğu görülmüştür.

**Çizelge 5.7.** Betonların ultrases geçiş hızı değerleri

Karışım Kodu	7 Günlük $U_{pv}$ (km/sn)	28 Günlük $U_{pv}$ (km/sn)	56 Günlük $U_{pv}$ (km/sn)
K	3.67	3.83	3.91
100A/4/0.5	3.36	3.78	3.94
100A/6/0.5	3.81	4.22	4.36
75A25B/6/1	3.09	3.43	3.76
75A25B/6/0.75	3.27	3.54	3.84
50A50B/6/1.25	3.21	3.33	3.48
50A50B/6/1	3.29	3.43	3.55
25A75B/6/1.25	2.84	2.98	3.08
25A75B/6/1	2.71	2.82	2.97
100B/6/1.5	2.42	2.50	2.54
100B/8/1.25	2.74	2.89	2.92



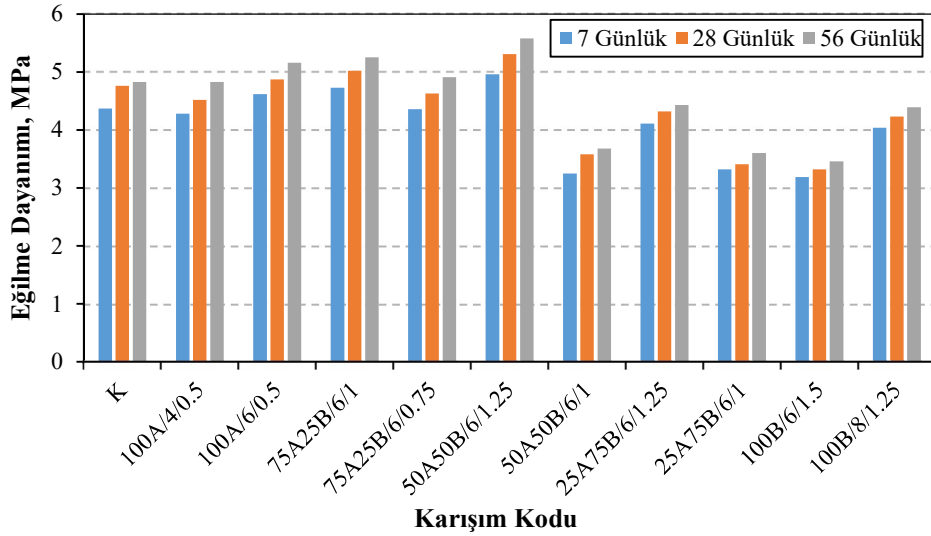
Şekil 5.40. Betonların ultras ses geçiş hızı değerleri

### 5.2.6 Eğilme dayanımı

Bu çalışmada üretilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri Çizelge 5.8 ile Şekil 5.41’de verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, UK içeriği ile birlikte alkali ile aktive edilmiş betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin genellikle azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, 100A ve 75A25B serisi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlarda ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda, kontrol betonlarına göre daha yüksek  $f_{fs}$  değerleri elde edilebilmiştir. Ancak, 50A50B/6/1 kodlu betonların ve bağlayıcı malzeme olarak 25A75B ve 100B serisi betonların tamamının 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda gözlenmiştir. 50A50B/6/1.25 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak %13, %12 ve %16 oranlarında daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ise 100B/6/1.5 kodlu betonlarda görülmüştür. 100B/6/1.5 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri kontrol betonlarından sırasıyla yaklaşık olarak %27, %30 ve %28 oranlarında daha düşük elde edilmiştir. Ayrıca, üretilen betonların  $f_{fs}$  değerleri artan kür yaşı ile birlikte %8 ile %13 oranları arasında değişen miktarlarda artmıştır.

**Çizelge 5.8.** Betonların eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımları

Karışım Kodu	7 Günlük $f_{fs}$ (MPa)	28 Günlük $f_{fs}$ (MPa)	56 Günlük $f_{fs}$ (MPa)	7 Günlük $f_c$ (MPa)	28 Günlük $f_c$ (MPa)	56 Günlük $f_c$ (MPa)	7 Günlük $f_{sts}$ (MPa)	28 Günlük $f_{sts}$ (MPa)	56 Günlük $f_{sts}$ (MPa)
K	4.37	4.76	4.83	25.82	29.72	32.24	2.61	2.79	2.83
100A/4/0.5	4.28	4.52	4.83	26.41	30.34	33.83	2.44	2.63	2.81
100A/6/0.5	4.62	4.87	5.16	29.54	33.25	36.91	2.58	2.75	2.98
75A25B/6/1	4.73	5.02	5.25	31.13	35.26	38.42	2.74	3.01	3.16
75A25B/6/0.75	4.36	4.63	4.91	30.42	33.07	36.84	2.79	2.97	3.09
50A50B/6/1.25	4.96	5.31	5.58	27.91	30.84	33.71	2.75	2.92	3.01
50A50B/6/1	3.25	3.58	3.68	20.95	23.72	25.28	2.17	2.21	2.36
25A75B/6/1.25	4.11	4.32	4.43	17.50	18.91	20.49	2.3	2.36	2.49
25A75B/6/1	3.32	3.41	3.60	14.21	15.12	16.16	1.81	1.87	1.94
100B/6/1.5	3.19	3.32	3.46	12.53	13.40	14.37	1.67	1.73	1.79
100B/8/1.25	4.04	4.23	4.39	16.24	17.73	18.45	2.22	2.27	2.35

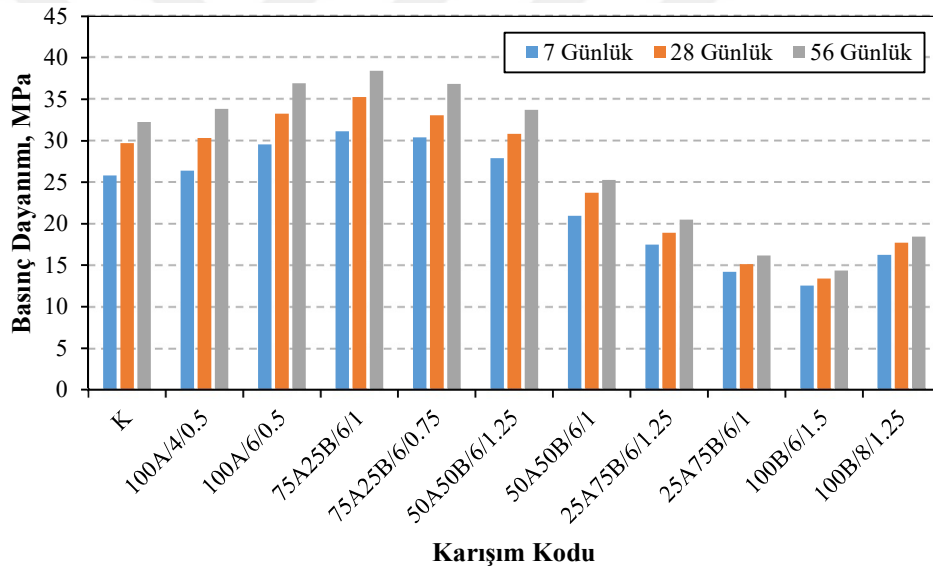


**Şekil 5.41.** Betonların eğilme dayanımları

### 5.2.7 Basınç dayanımı

Bu çalışmada üretilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri Çizelge 5.8 ile Şekil 5.42’de verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, alkali ile aktive edilmiş betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha yüksek veya daha düşük değerler aldığı görülmüştür. Kontrol betonlarından daha yüksek  $f_c$  değerlerinin elde edildiği alkali ile aktive edilmiş betonların 100A ve 75A25B serisi ile üretilen betonlar

ile 50A50B/6/1.25 kodlu betonlar olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonlar ile 50A50B/6/1 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. En yüksek 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri 75A25B/6/1 kodlu betonlardan elde edilirken, en düşük  $f_c$  değerleri 100B/6/1.5 kodlu betonlarda görülmüştür. Bununla birlikte, 75A25B/6/1 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerlerinin kontrol betonlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak %21, %19 ve %19 oranlarında daha yüksek; 100B/6/1.5 kodlu betonların  $f_c$  değerlerinin ise kontrol betonlarından sırasıyla yaklaşık olarak %52, %55 ve %56 oranlarında daha düşük olduğu gözlenmiştir. Betonların  $f_c$  değerlerinin düşüşü üzerinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılan UK miktarlarının artmasının etkili olduğu görülmektedir. Her bir karışım kendi içerisinde kür süresine göre değerlendirilirse, kür süresinin artmasıyla birlikte betonların  $f_c$  değerleri %13 ile %28 oranları arasında değişen miktarlarda artmıştır.

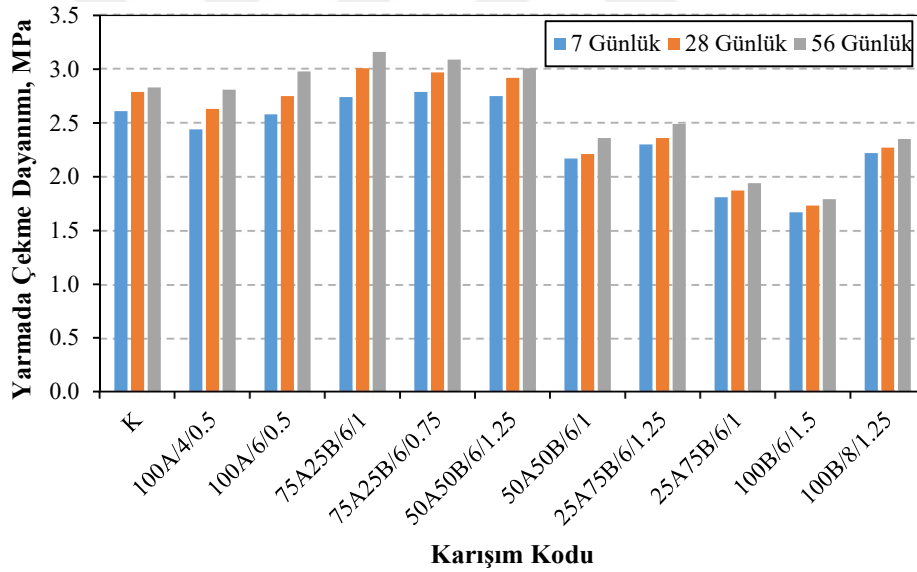


Şekil 5.42. Betonların basınç dayanımları

### 5.2.8 Yarmada çekme dayanımı

Bu çalışmada üretilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri Çizelge 5.8 ile Şekil 5.43'de verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, 75A25B/6/1, 75A25B/6/0.75 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu betonların 7 ve 28 günlük  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu; 100A/4/0.5 kodlu betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonlarının değerleri ile

neredeyse eşit olduğu ve 100A/6/0.5 kodlu betonların 56 günlük  $f_{sts}$  değerlerinin ise kontrol betonlarından %5 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonlar ile 50A50B/6/1 kodlu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu düşüş üzerinde karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanılan UK malzemesinin etkili olduğu söylenebilir. En yüksek  $f_{sts}$  değerleri 75A25B/6/1 ile 75A25B/6/0.75 kodlu betonlardan elde edilirken bu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak %5, %8 ve %12 ile %7, %6 ve %9 oranlarında daha yüksek elde edilmiştir. En düşük 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri ise 100B/6/1.5 kodlu betonlarda gözlenirken, bu betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{sts}$  değerleri kontrol betonlarından sırasıyla %36, %38 ve %37 oranlarında daha düşük elde edilmiştir. Ayrıca, üretilen betonların  $f_{sts}$  değerleri artan kür yaşı ile birlikte yaklaşık olarak %7 ile %15 oranları arasında değişen miktarlarda artmıştır.



Şekil 5.43. Betonların yarmada çekme dayanımları

### 5.2.9 Asit etkisine dayanıklılık

Asit etkisine maruz bırakılan alkali ile aktive edilmiş hafif betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler Çizelge 5.9 ve Şekil 5.44'de sunulmuştur. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, %10 derişimle asit çözeltisinde bekletilen kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre 28 günde %33 ve 56 günde %39 azaldığı; %20 derişimle asit çözeltisinde bekletilen kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin ise 28 günde %45 ve 56

günde %58 azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, 100A ve 75A25B serisi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre %10 asit çözeltisinde 28 günde %18 ile %24 oranları arasında; 56 günde de %30 ile %34 arasında azaldığı gözlenmiştir. Bu betonlar %20 asit çözeltisinde 28 gün bekletildikten sonra,  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %25 ile %32 oranları arasında; 56 gün bekletildikten sonra ise %38 ile %45 arasında azalmıştır. Böylece, 100A ve 75A25B serisi betonların  $f_c$  değerlerinin asit etkisinde kontrol betonlarıyla benzer değişim gösterdiği görülmüştür. 50A50B/6/1.25 kodlu betonların %10 derişimle asit çözeltisinde 28 ve 56 gün bekletildikten sonra  $f_c$  değerlerinin sırasıyla deney öncesine göre %7 ve %12 oranlarında azaldığı, %20 asit çözeltisinde 28 ve 56 gün bekletildiğinde ise bu betonların  $f_c$  değerlerinin sırasıyla yaklaşık olarak %8 ve %16 oranlarında azaldığı görülmüştür. 50A50B/6/1.25 kodlu betonların  $f_c$  değerlerinde asit etkisi nedeniyle meydana gelen kayıplar kontrol, 100A ve 75A25B serisi betonlardan daha az olmuştur.

**Çizelge 5.9.** Asitin betonların basınç dayanımlarına etkisi

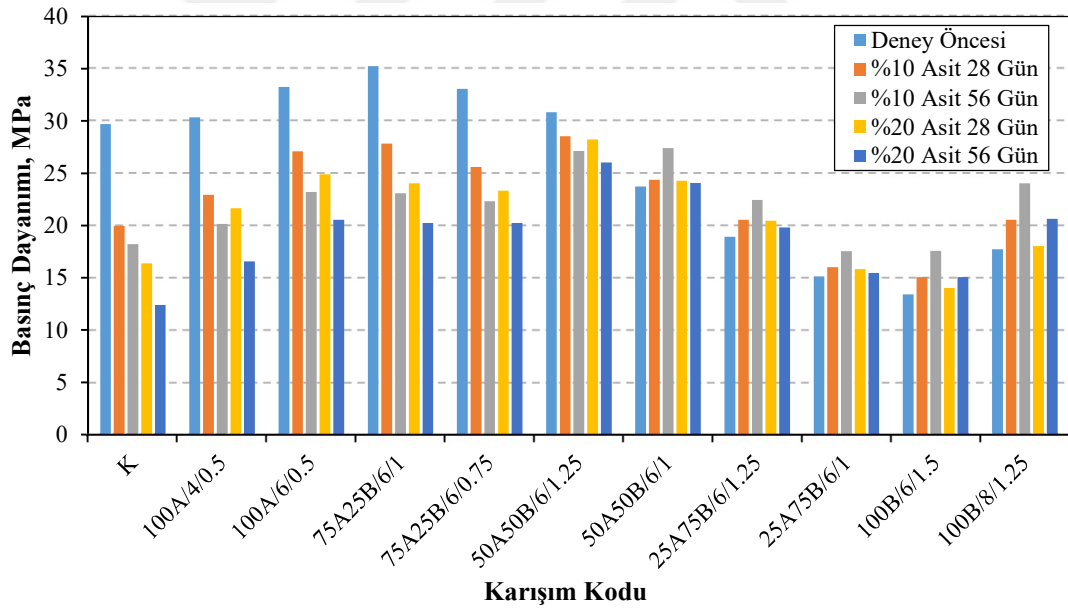
Karışım Kodu	Deney Öncesi	%10 Asit		%20 Asit	
		28 Gün	56 Gün	28 Gün	56 Gün
	$f_c$ (MPa)				
K	29.72	19.97	18.23	16.39	12.41
100A/4/0.5	30.34	22.95	20.15	21.66	16.56
100A/6/0.5	33.25	27.09	23.21	24.89	20.54
75A25B/6/1	35.26	27.83	23.08	24.04	20.25
75A25B/6/0.75	33.07	25.61	22.32	23.34	20.23
50A50B/6/1.25	30.84	28.54	27.14	28.22	26.02
50A50B/6/1	23.72	24.37	27.42	24.28	24.08
25A75B/6/1.25	18.91	20.55	22.44	20.46	19.81
25A75B/6/1	15.12	16.02	17.55	15.82	15.47
100B/6/1.5	13.40	15.06	17.56	14.01	15.05
100B/8/1.25	17.73	20.56	24.04	18.03	20.63

50A50B/6/1 kodlu betonların  $f_c$  değerleri ise %10 asitte 28 günün sonunda yaklaşık olarak deney öncesine göre %3, 56 günün sonunda da %15 artmıştır. Bu betonlar 28 gün %20 asit çözeltisinde bekletildiğinde ise  $f_c$  değerleri deney öncesine göre yaklaşık %2 artarken, aynı çözeltilde 56 gün bekletildiğinde ise  $f_c$  değerleri yaklaşık %1.5 artmıştır. %10 asit çözeltisi 50A50B/6/1 kodlu betonların dayanım gelişimini engelleyememiş, bu betonların  $f_c$  değerleri artmıştır. %20 asit çözeltisinde ise bu betonların  $f_c$  değerlerinde deney



öncesine göre çok az oranlarda artış meydana gelmiştir. %20 gibi oldukça yüksek konsantrasyondaki asit çözeltisi betonların dayanım gelişimini etkilemiştir. Yani, %10 asit çözeltisinde olduğu gibi deney öncesine göre  $f_c$  değerlerinde önemli bir değişimin olmadığı gözlenmiştir.

25A75B serisi bağlayıcı malzeme içeren betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %10 asitte 28 gün bekletildikten sonra %6 ve %9 oranlarında, 56 gün bekletildikten sonra ise %16 ve %19 oranlarında artmıştır. Ayrıca, bu betonlar %20 asitte 28 gün bekletildiğinde  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %5 ve %8 oranlarında, 56 gün bekletildiğinde ise %2 ile %5 oranlarında artmıştır. 25A75B serisi betonların  $f_c$  değerleri %10 asitte olumsuz etkilenmemiş ve dayanım gelişimi devam etmiş ve hatta  $f_c$  değerlerindeki artışlar 50A50B/6/1 kodlu betonlardan daha fazla olmuştur. %20 asit etkisinde ise bu betonların dayanım gelişimleri 50A50B/6/1 kodlu betonlarda olduğu gibi olumsuz etkilense de, deney öncesine göre  $f_c$  değerleri daha yüksek olmuştur.



**Şekil 5.44.** Asit çözeltisinin betonların basınç dayanımlarına etkisi

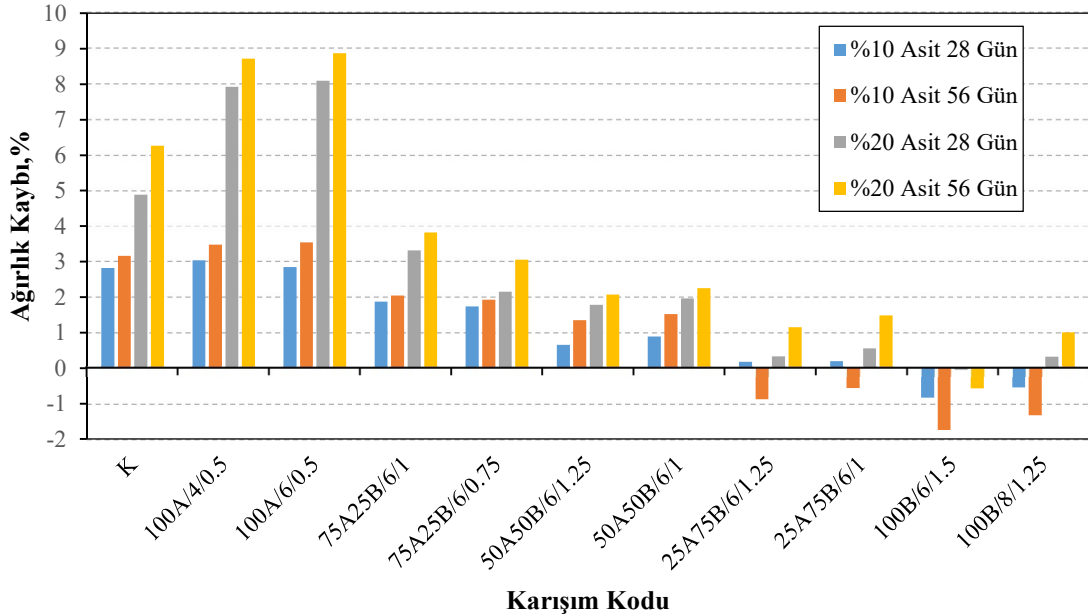
28 gün boyunca %10 asit çözeltisinde bekletilen 100B serisi betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %12 ve %16 oranlarında artmış, aynı çözeltide 56 gün bekletildiğinde ise  $f_c$  değerlerindeki artışlar %31 ve %35 oranlarına ulaşmıştır. Bununla birlikte, bu betonlar %20 asitte 28 gün bekletildiğinde  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %2 ile %5 oranlarında artmış, 56 gün bekletildiğinde ise %12 ve %16 oranlarında artmıştır. Böylece, %10

derişimli asit çözeltileri 100B serisi betonların  $f_c$  gelişimini olumsuz etkilemediği görülmüştür. Bununla birlikte, %20 derişimli asit çözeltileri ise bu betonların sadece dayanım gelişimini olumsuz etkilemiş olsa da 56 gün boyunca bu çözeltide bekletilmesine rağmen 100B serisi betonların  $f_c$  değerlerinde %16'ya varan artışlar görülmesi, bu betonları HCl etkisine dayanıklı kılmaktadır.

Bu deneysel çalışma kapsamında 100A ve 75A25B serisi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlarla kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin asit etkisinde önemli derecede azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriği arttıkça asit etkisi nedeniyle  $f_c$  değerlerinde meydana gelen kayıpların genellikle azaldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak asit etkisinde daha kolay çözünebilen ve bozulabilen Ca içerikli jel oluşumlarının UK içeriği ile birlikte azalması olarak gösterilebilir (Aiken vd., 2018; Vafaei vd., 2018; Lee ve Lee, 2016). Ayrıca, 25A75B ve 100B serisi betonlarda asit etkisi deney öncesine göre  $f_c$  kaybına neden olmamış, hatta  $f_c$  değerlerinde farklı oranlarda artışlar görülmüştür. Bu nedenle, alkali ile aktive edilmiş betonların asit etkisine dayanıklılığının daha çok bağlayıcı malzeme içeriğine ve bu malzemelerin alkali ile aktive edilmesi sonucu meydana gelen jel türlerine bağlı olduğu söylenebilir.

Bu çalışmada üretilen betonların ağırlıklarında asit etkisiyle meydana gelen değişimler Şekil 5.45'te verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, 100A serisi ile üretilen betonlar hariç, alkali ile aktive edilmiş betonlarda asit etkisi nedeniyle meydana gelen ağırlık kayıplarının kontrol betonlarına göre daha az olduğu görülmüştür. 28 ve 56 gün boyunca %10 derişimli asit çözeltilerinde bekletilen kontrol betonlarının ağırlıkları yaklaşık %3 azalmış, %20 asitte ise 28 ve 56 gün sonunda ağırlıkları sırasıyla %5 ve %6 oranlarında azalmıştır. 100A serisi betonlarda ise kayıplar %20 asitte 56 gün sonunda %9 seviyesine ulaşmıştır. %10 asit çözeltilerinde bekletilen 75A25B serisi betonların ağırlık kayıpları %2 seviyesinde kalırken, %20 asit ortamı bu betonların ağırlıklarını 56 günde %3 ile %4 oranları arasında azaltmıştır. 75A25B serisi betonlarda asit etkisi nedeniyle meydana gelen ağırlık kayıplarının 100A serisi ve kontrol betonlarından daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca, UK içeriğinin alkali ile aktive edilmiş betonlarda asit etkisinin meydana getirdiği ağırlık kayıplarını azalttığı görülmüştür. UK içeriğinin alkali ile aktive edilmiş betonlardaki asit etkisi nedeniyle meydana gelen ağırlık kayıplarını azaltmadaki olumlu etkisi 50A50B serisi betonlarda da devam etmiştir. Bu betonlarda asit etkisi

nedeniyle meydana gelen ağırlık kayıpları %2 seviyesinde kalmıştır. 28 gün boyunca %10 asit çözeltisinde bekletilen 25A75B serisi betonların ağırlıkları neredeyse aynı kalmış, bu betonlar 56 gün aynı çözeltide bekletildiğinde ise ağırlıkları yaklaşık olarak %0.5 ve %0.9 oranlarında artmıştır. 25A75B serisi betonların ağırlıkları %20 asitte 28 gün sonunda %0.3 ve %0.5 oranlarında, 56 gün sonunda ise %1 ile %1.5 oranlarında azalmıştır. 100B/6/1.5 ve 100B/8/1.25 kodlu betonların ağırlıklarının %10 asitte 28 gün sonunda sırasıyla %0.8 ve %0.5 oranlarında arttığı, 56 gün sonunda da %1.7 ve %1.3 oranlarında arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, 100B/6/1.5 kodlu betonların ağırlıkları %20 asitte 28 gün bekletildikten sonra neredeyse aynı kalmış, 56 gün bekletildiğinde ise yaklaşık %0.6 artmıştır. %20 asitte bekletilen 100B/8/1.25 kodlu betonların ağırlıkları ise 28 günde %0.3 azalırken, 56 günde %1 azalmıştır.



**Şekil 5.45.** Asit etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları

Alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında asit etkisi nedeniyle meydana gelen değişimler  $f_c$  değerlerindeki değişimlerle benzerlik göstermiştir. Sadece 50A50B/6/1.25 ve 50A50B/6/1 kodlu betonların asit etkisinde ağırlıklarında benzer değişim görülürken, bu betonların  $f_c$  değerlerinde asit etkisiyle farklı değişimler görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriği arttıkça, asit etkisi nedeniyle  $f_c$  değerlerinde ve ağırlıklarında meydana gelen kayıplar daha az olmuştur. Ayrıca, 25A75B ve 100B serisi betonlarda görülen düşük oranlardaki ağırlık artışlarının nedeni olarak bu betonlarda

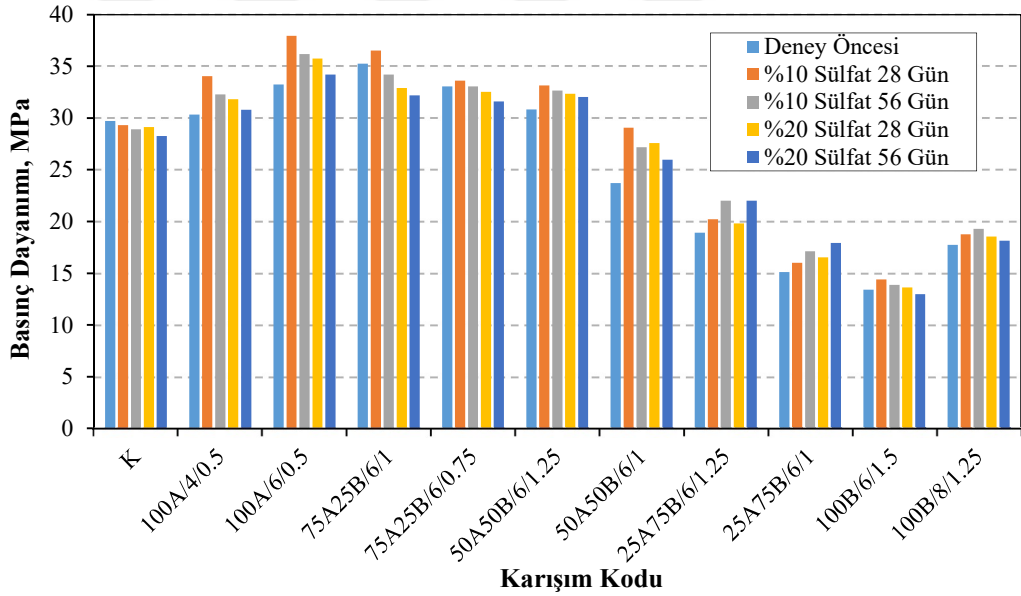
bulunan Na içeriğinin HCl çözeltisindeki Cl<sup>-</sup> iyonlarını bağlayıp beton bünyesine yerleşmesi veya bu betonların boşluklarına asit solüsyonunun zamanla daha fazla difüzyonu olarak gösterilebilir.

### 5.2.10 Sülfat etkisine dayanıklılık

Sülfat çözeltisinde bekletilen betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler Çizelge 5.10 ve Şekil 5.46'da sunulmuştur. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, %10 sülfat çözeltisinde bekleyen kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin 28 gün sonunda deney öncesine göre %1.3, 56 gün sonunda ise %2.7 azaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, %20 sülfat çözeltisinde 28 gün bekletilen kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre %2 azaldığı, aynı çözeltide 56 gün bekletildiğinde ise kayıpların %5'e ulaştığı gözlenmiştir. Burada, sülfat çözeltisi derişiminde ve kontrol betonlarının bu çözeltilere maruz kaldığı gün sayısındaki artış ile birlikte  $f_c$  kayıplarının da arttığı görülmüştür. 28 gün %10 sülfatta bekleyen 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu betonların  $f_c$  değerleri sırasıyla deney öncesine göre %12 ve %14 artmış, 56 gün aynı çözeltide bekletildiğinde de  $f_c$  değerleri sırasıyla yaklaşık olarak deney öncesine göre %6 ve %9 oranlarında artmıştır. Bu betonlar %20 sülfatta 28 gün bekletildiğinde  $f_c$  değerleri sırasıyla yaklaşık olarak deney öncesine göre %5 ile %7.5 oranlarında artmış, 56 gün bekletildiğinde ise deney öncesine göre %1.5 ve %3 oranlarında artmıştır. Sülfat çözeltisi 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu betonların  $f_c$  değerlerini deney öncesine göre azaltmamış, ancak derişim ve çözeltilere maruz kalınan gün sayısı arttıkça betonların dayanım gelişimi olumsuz etkilenmiş ve 56 gün sülfatta bekleyen betonların  $f_c$  değerleri 28 gün bekleyen betonların değerlerine göre daha düşük olmuştur. 28 gün %10 sülfat çözeltisinde bekletilen 75A25B/6/1 ve 75A25B/6/0.75 kodlu betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık %4 ve %2 artmıştır. 75A25B/6/1 kodlu betonlar aynı çözeltide 56 gün bekletildiğinde  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %3 azalmış, 75A25B/6/0.75 kodlu betonların  $f_c$  değerleri ise deney öncesiyle aynı olmuştur. 75A25B/6/1 ve 75A25B/6/0.75 kodlu betonlar %20 sülfat çözeltisinde 28 ve 56 gün bekletildiğinde ise  $f_c$  değerleri deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %7 ile %2 ve %9 ile %4.5 oranlarında azalmıştır. 75A25B kodlu betonlar %10 sülfat etkisinde kısa sürede kontrol betonlarından daha dayanıklı iken, sülfat çözeltisinin etki süresi ve derişimi arttıkça bu betonların  $f_c$  değerlerinde kontrol betonlarında olduğundan daha fazla kayıplar görülmüştür.

**Çizelge 5.10.** Sülfatın betonların basınç dayanımlarına etkisi

Karışım Kodu	Deney Öncesi	%10 Sülfat		%20 Sülfat	
		28 Gün	56 Gün	28 Gün	56 Gün
	$f_c$ (MPa)				
K	29.72	29.32	28.92	29.12	28.25
100A/4/0.5	30.34	34.04	32.28	31.81	30.81
100A/6/0.5	33.25	37.96	36.19	35.76	34.21
75A25B/6/1	35.26	36.53	34.19	32.91	32.18
75A25B/6/0.75	33.07	33.62	33.07	32.52	31.59
50A50B/6/1.25	30.84	33.14	32.64	32.34	32.05
50A50B/6/1	23.72	29.07	27.17	27.59	25.99
25A75B/6/1.25	18.91	20.21	22.01	19.81	22.01
25A75B/6/1	15.12	16.02	17.12	16.52	17.93
100B/6/1.5	13.40	14.38	13.86	13.61	12.98
100B/8/1.25	17.73	18.75	19.29	18.53	18.14



**Şekil 5.46.** Sülfat çözeltisinin betonların basınç dayanımlarına etkisi

50A50B/6/1.25 ve 50A50B/6/1 kodlu betonlar %10 sülfat çözeltisinde 28 ve 56 gün bekletildiğinde, bu betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %7.5 ile %22.5 ve %6 ile %14.5 oranlarında artmıştır. Benzer şekilde, 50A50B/6/1.25 ve 50A50B/6/1 kodlu betonlar %20 sülfat çözeltisine 28 ve 56 gün maruz bırakıldığında ise  $f_c$  değerleri sırasıyla yaklaşık olarak %5 ile %16 ve %4 ile %9.5 oranlarında artmıştır. Sülfat etkisine maruz kalan 50A50B serisi betonlarda  $f_c$  kaybı görülmediği gibi,  $f_c$

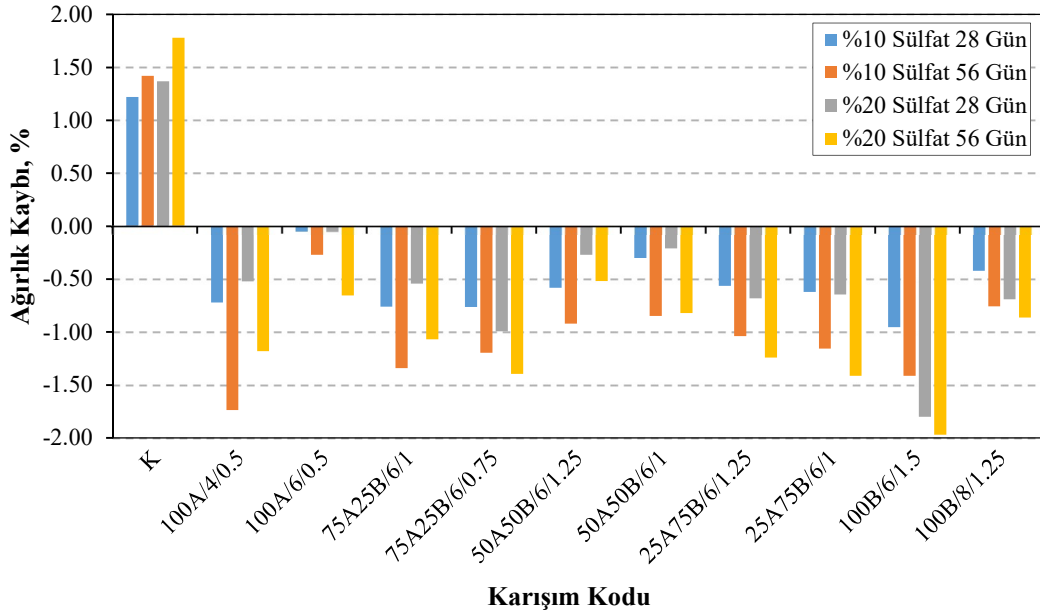
değerlerinde önemli oranlarda artış gözlenmiştir. Sülfat çözeltisi bu betonların sadece  $f_c$  gelişimini olumsuz yönde etkilemiş, 56 gün gün sülfatta bekleyen betonların  $f_c$  değerleri 28 gün gün sülfatta bekleyen betonların değerlerine göre daha düşük elde edilmiştir.

25A75B/6/1.25 ve 25A75B/6/1 kodlu betonlar %10 sülfat çözeltisinde 28 ve 56 gün bekletildiğinde, bu betonların  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %7 ile %6 ve %16 ile %13 oranlarında arttığı görülmüştür. Aynı betonlar 28 ve 56 gün boyunca %20 sülfat çözeltisinde bekletildiğinde ise  $f_c$  değerleri deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %5 ile %9 ve %16 ile %18 oranlarında artmıştır. Böylece, sülfat çözeltisinin 25A75B serisi betonların  $f_c$  değerlerini olumsuz etkilemediği görülmüştür.

28 ve 56 gün boyunca %10 sülfat çözeltisinde bekletilen 100B/6/1.5 ve 100B/8/1.25 kodlu betonların  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre sırasıyla yaklaşık olarak %7 ile %6 ve %3.5 ile %9 oranlarında arttığı görülmüştür. 28 ve 56 gün %20 sülfatta bekletilen 100B/8/1.25 kodlu betonların  $f_c$  değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %4.5 ile %2 oranlarında artış görülmüştür. Bununla birlikte, %20 sülfatta 28 gün bekletilen 100B/6/1.5 içeren betonların  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre %1.5 arttığı, 56 gün aynı çözeltide bekletildiğinde ise bu betonların  $f_c$  değerlerinin deney öncesine göre %3 daha az olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmada üretilen alkali ile aktive edilmiş betonlarda sülfat etkisi nedeniyle meydana gelen  $f_c$  kaybı 75A25B/6/1 kodlu betonlar hariç kontrol betonlarına göre daha az olmuştur. Alkali ile aktive edilmiş betonların sülfat saldırısına kontrol betonlarından (Portland çimentosu ile üretilen bağlayıcılara göre) daha dayanıklı olduğu daha önce yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir (Džunuzović vd., 2017; Bakharev vd., 2002; Rodriguez vd., 2008). Alkali ile aktive edilmiş betonların sülfat etkisine daha dayanıklı olması, kontrol betonlarında Portland çimentosunun hidrasyonu sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$ 'in alkali ile aktive edilmiş betonlarda oluşmaması ile açıklanabilir (Thunuguntla vd., 2018; Komljenović vd., 2013). Bununla birlikte, sülfat çözeltilerinden en az etkilenen betonların 50A50B/6/1, 25A75B/6/1.25 ve 25A75B/6/1 kodlu betonlar olduğu görülmüştür. Sülfat etkisindeki alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler üzerinde Ms modülünün belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bununla birlikte, sülfat etkisindeki alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerleri üzerinde bağlayıcı malzeme içeriğinin de belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Üretilen betonların ağırlıklarında sülfat etkisiyle meydana gelen değişimler Şekil 5.47’de verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, sadece kontrol betonlarında ağırlık kayıplarının meydana geldiği, alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında ise %0.05 ile %2 arasında artışlar olduğu görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarındaki artışın sebebi olarak sülfat çözeltisinin bu betonlardaki boşluklu jel yapılarının içerisine zamanla difüzyonu gösterilebilir. Kontrol betonlarının ağırlıklarında meydana gelen kayıplar sülfat çözeltisi derişimi ve bu çözelti etkisinde kalma süresi artsa da, %2 seviyesinin altında kalmıştır. Alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında meydana gelen artışlar da bağlayıcı malzeme içeriğinin, Ms modülünün, sülfat çözeltisi derişimine veya sülfat çözeltisine maruz kalma süresinin belirgin bir etkisi olmamıştır. Ayrıca, kontrol betonlarının sülfat etkisi nedeniyle  $f_c$  değerleri ile ağırlıklarında meydana gelen değişimler birbirleri ile benzerlik gösterirken, bu benzerlik alkali ile aktive edilmiş betonlarda görülmemiştir.



Şekil 5.47. Sülfat etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları

### 5.2.11 Yüksek sıcaklık etkisine dayanıklılık

Yüksek sıcaklığın alkali ile aktive edilmiş hafif betonların  $f_c$  değerlerinde meydana getirdiği değişimler Çizelge 5.11 ve Şekil 5.48’de sunulmuştur. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, kontrol betonlarının  $f_c$  değerlerinin yüksek sıcaklık etkisiyle azaldığı,  $f_c$  kayıplarının 800 °C’de çok daha belirgin olduğu görülmüştür. Öyle ki, 600 °C’ye maruz

birakılan kontrol betonlarının  $f_c$  değerleri deney öncesi  $f_c$  değerlerine göre %26 daha düşük elde edilirken, 800 °C'de  $f_c$  değerleri deney öncesine göre %58 oranında daha düşük elde edilmiştir. 100A ve 75A25B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle meydana gelen değişimler kontrol betonlarıyla benzerlik göstermiş, bu betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre 400 °C de %15 ile %21 arasında, 600 °C de %22 ile %29 arasında ve 800 °C de %55 ile %58 arasında azalmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle 50A50B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen azalma, kontrol betonlarına göre daha azdır. Bu betonların  $f_c$  değerleri deney öncesine göre 400 °C de %8 ile %13 oranlarında, 600 °C de %22 ve 800 °C de %48 ile %51 oranlarında azalmıştır.

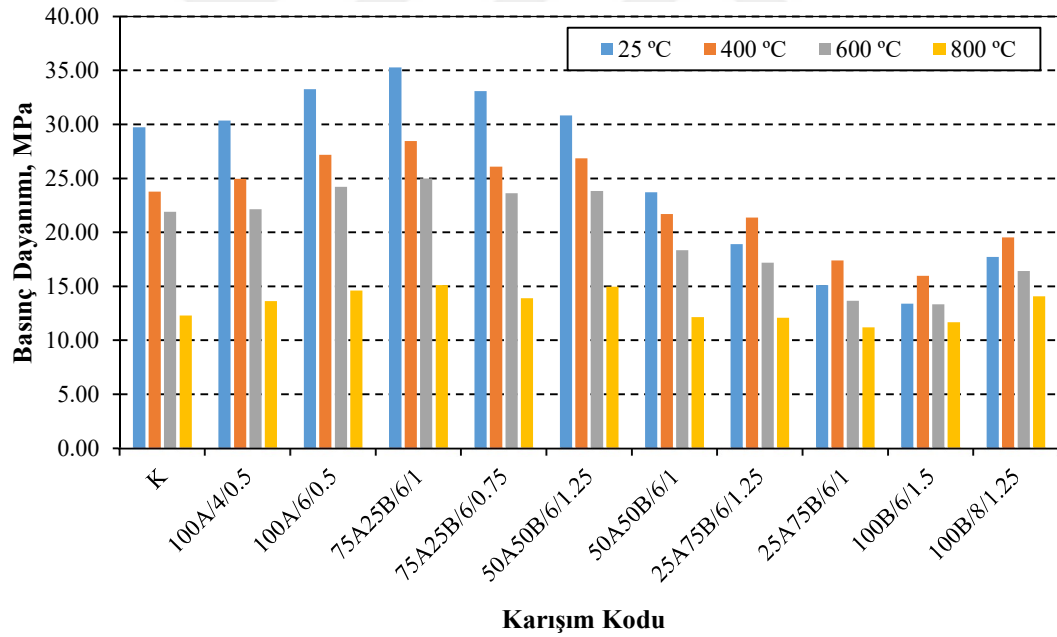
Yüksek sıcaklık nedeniyle 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler kontrol betonlarına kıyasla oldukça farklı olmuştur. Öyle ki, kontrol betonlarının  $f_c$  değerleri 400 °C de deney öncesine göre %20 azalırken, 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerleri %10 ile %19 oranları arasında artmıştır. 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde görülen artışın nedeni olarak bu betonlardaki reaksiyona girmemiş olan UK parçacıklarının sıcaklığın 400 °C ye çıkması ile sinterleme reaksiyonu yapması olarak açıklanabilir (Pan vd., 2018; Zhang vd., 2016). Bununla birlikte, 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerleri 600 °C de deney öncesine göre %9 azalırken, 100B/8/1.25 kodlu betonların  $f_c$  değerleri %7 azalmış, 100B/6/1.5 kodlu betonların  $f_c$  değerleri ise deney öncesi ile neredeyse aynı kalmıştır. Ayrıca, 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerleri 800 °C de %26 ile %36 arasında, 100B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerleri ise %13 ile %20 arasında azalmıştır.

Yüksek sıcaklık, alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinde farklı etkiler meydana getirmiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriği arttıkça bu betonların  $f_c$  değerlerindeki kayıplar genellikle azalmıştır. Bunun nedeni olarak YFC malzemesinin alkaliler ile aktive edilmesi ile meydana gelen jel yapılarının (C-A-S-H, C-(N)-A-S-H) UK malzemesinin aktive edilmesi ile meydana gelen jel yapılarına (N-A-S-H) göre yüksek sıcaklık etkisinde dehidrasyona ve bozulmaya daha yatkın olması olarak gösterilebilir (Alarcon-Ruiz vd., 2005).



**Çizelge 5.11.** Yüksek sıcaklığın betonların basınç dayanımlarına etkisi

Karışım Kodu	Deney Öncesi $f_c$ (MPa)	400 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki $f_c$ (MPa)	600 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki $f_c$ (MPa)	800 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki $f_c$ (MPa)
K	29.72	23.78	21.91	12.30
100A/4/0.5	30.34	25.96	23.53	13.65
100A/6/0.5	33.25	27.17	24.22	14.62
75A25B/6/1	35.26	28.46	24.97	15.12
75A25B/6/0.75	33.07	26.09	23.62	13.89
50A50B/6/1.25	30.84	26.86	23.83	14.98
50A50B/6/1	23.72	21.71	18.36	12.15
25A75B/6/1.25	18.91	21.38	17.18	12.09
25A75B/6/1	15.12	17.39	13.67	11.20
100B/6/1.5	13.40	15.96	13.34	11.66
100B/8/1.25	17.73	19.54	16.41	14.09



**Şekil 5.48.** Yüksek sıcaklığın betonların basınç dayanımına etkisi

Yüksek sıcaklığın alkali ile aktive edilmiş hafif betonların ağırlıklarında meydana getirdiği değişimler Çizelge 5.12 ve Şekil 5.49'da verilmiştir. Bu şekil ve çizelge incelendiğinde, alkali ile aktive edilmiş betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıplarının kontrol betonlarına göre daha az olduğu görülmüştür. Kontrol betonlarının ağırlıkları 400 °C ye maruz bırakıldıktan sonra yaklaşık %12 azalırken, alkali

ile aktive edilmiş betonların ağırlıkları bu sıcaklıkta %8 ile %11 arasında değişen oranlarda azalmıştır. Bununla birlikte, 100A ve 75A25B serisi ile üretilen betonlarda ağırlık kayıpları sıcaklık 400 °C den 800 °C ye çıktığında %5'e ulaşan oranlarda artmıştır. 100B ve 25A75B serisi betonlarda ise ağırlık kayıpları önemli ölçüde 400 °C de meydana gelirken, sıcaklığın 800 °C ye çıkması ağırlık kayıplarını %1'in altında artırmıştır. Kontrol betonları ile 50A50B serisi betonlarda ise sıcaklığın 400 °C den 800 °C ye çıkması ile ağırlık kayıpları %1 ile %2.5 arasında değişen oranlarda artmıştır.

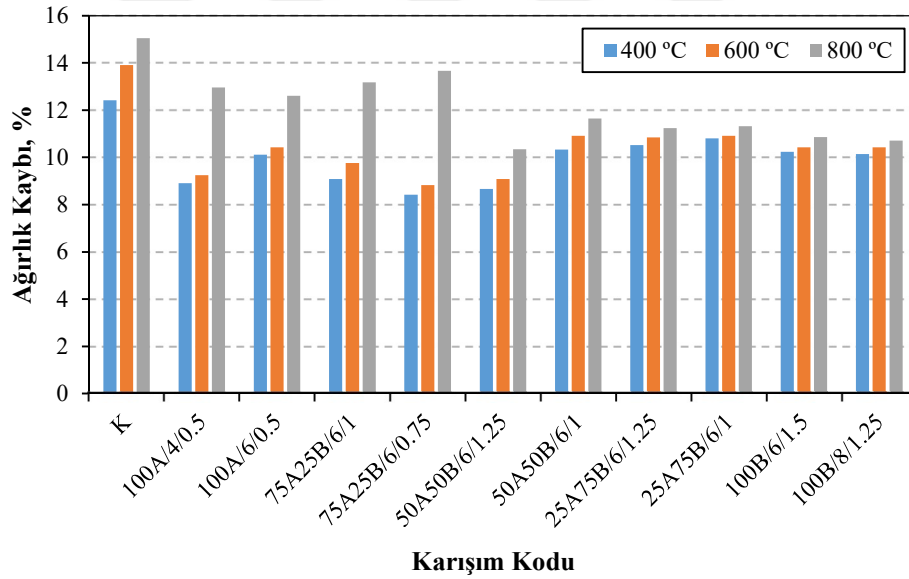
Özetle; üretilen betonların yüksek sıcaklık etkisiyle ağırlıklarında meydana gelen değişimler irdelendiğinde tüm betonlarda ağırlık kayıplarının önemli ölçüde 400 °C de meydana geldiği görülmüştür. Bunun nedeni betonların matrislerindeki fiziksel olarak bağlı suyun buharlaşması gösterilebilir (Alarcon-Ruiz vd., 2005). Bununla birlikte, 400 °C den yüksek sıcaklıklarda kontrol betonlarında görülen ağırlık kaybı artışının diğer bir nedeni de  $Ca(OH)_2$ 'in bileşenlerine ayrışmasıdır (Alonso ve Fernandes, 2004). Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında meydana gelen değişim sıcaklık 800 °C ye ulaştığında benzerlik göstermemiş; YFC içeriği arttıkça kayıplardaki artış daha fazla, UK içeriği arttıkça da genellikle daha az olmuştur.

**Çizelge 5.12.** Yüksek sıcaklığın betonların ağırlıklarına etkisi

Karışım Kodu	Deney Öncesi Ağırlık, g	400 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki Ağırlık, g	600 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki Ağırlık, g	800 °C ye Maruz Kaldıktan Sonraki Ağırlık, g
K	1760	1541	1515	1495
100A/4/0.5	1719	1566	1560	1496
100A/6/0.5	1715	1541	1536	1499
75A25B/6/1	1698	1544	1532	1474
75A25B/6/0.75	1701	1558	1551	1468
50A50B/6/1.25	1673	1528	1521	1500
50A50B/6/1	1670	1497	1488	1475
25A75B/6/1.25	1629	1458	1452	1446
25A75B/6/1	1635	1458	1457	1450
100B/6/1.5	1608	1443	1440	1433
100B/8/1.25	1588	1427	1422	1418

100A ve 75A25B serisi ile üretilen betonlarda özellikle 800 °C de meydana gelen ağırlık kayıpları ile  $f_c$  değerlerindeki azalma birbirleri ile benzerlik göstermektedir. Bu durum

çalışmada kullanılan YFC malzemesinin alkali ile aktive edilmesi ile elde edilen bağlayıcı jelde suyun önemli yapısal bir bileşen olduğunu göstermektedir. Ayrıca, 100B ve 25A75B serisi betonlarda her ne kadar 800 °C de önemli bir ağırlık kaybı artışı gözlenmemiş olsa da, bu betonlarda 400 °C de meydana gelen ağırlık kaybı 100A ve 75A25B serisi betonlarda meydana gelen kayıplardan daha fazla olmuştur. Buna rağmen özellikle 400 °C de 100B ve 25A75B serisi (UK içeriği daha fazla olan) betonlarda meydana gelen ağırlık kayıplarına rağmen  $f_c$  değerlerinde artışlar görülmesi, bu betonlarda oluşan bağlayıcı jelin yapısındaki suyun baskın yapısal bir bileşen olmadığını göstermektedir. Benzer sonuçlara Provis ve Bernal (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada da ulaşılmıştır. Araştırmacılar UK malzemesinin alkalilerle aktive edilmesi ile elde edilen bağlayıcılarda meydana gelen N-A-S-H jelini N-A-S-(H) şeklinde ifade etmişlerdir. Bu ifade ediş şeklinde H yani suyun (parantez içinde yazılarak) UK malzemesinin alkalilerle aktive edilmesi ile elde edilen bağlayıcılarda baskın bir yapısal bileşen olmadığı ifade edilmiştir.



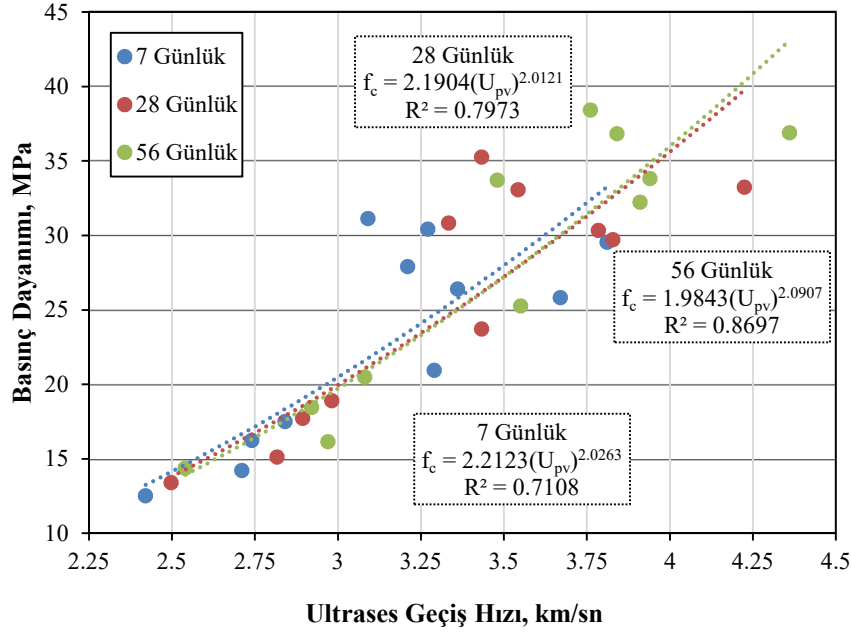
Şekil 5.49. Yüksek sıcaklık etkisiyle betonlarda meydana gelen ağırlık kayıpları

## 5.2.12 Betonların özellikleri arasındaki ilişkiler

### 5.2.12.1 Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki ilişki

Deneysel çalışmadan elde edilen alkali ile aktive edilmiş betonlar ile kontrol betonlarının 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile bu betonlar üzerinde ölçülen ultrases geçiş süresi

değerlerinden hesaplanan  $U_{pv}$  değerleri arasındaki ilişki Şekil 5.50’de sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde, betonların  $f_c$  ile  $U_{pv}$  değerleri arasında doğrusal bir ilişki olmasa da, bu değerler arasında yüksek sayılabilecek bir üstsel ilişkinin olduğu söylenebilir. Ayrıca, betonların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki korelasyonun kür yaşı ile belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür.

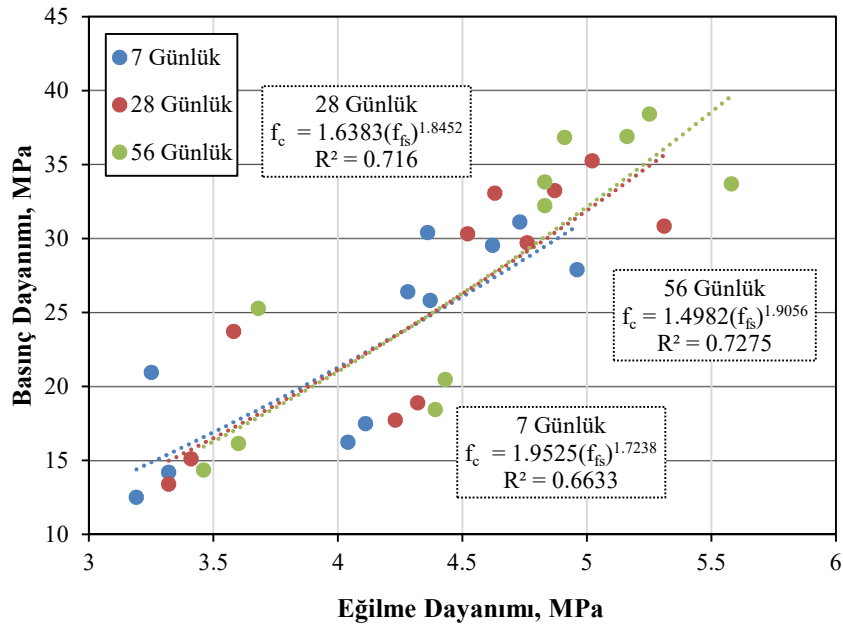


Şekil 5.50. Betonların basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı ilişkisi

### 5.2.12.2 Basınç dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki

Bu çalışmada üretilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri Şekil 5.51’de ilişkilendirilmiştir. Betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasında yüksek sayılabilecek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Ancak, betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasındaki korelasyonun,  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki korelasyona göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, betonların 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasındaki korelasyon birbirlerine yakın iken, 7 günlük değerler arasındaki korelasyona göre daha yüksek olmuştur. Alkali ile aktive edilmiş betonlardaki UK içeriği ile birlikte betonların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranı alkali ile aktive edilmiş harçlarda olduğu gibi genellikle artmıştır. Bu durum, betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasında daha yüksek bir korelasyon olmasını engellemiştir. Benzer sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir. Marjanović vd. (2015) yaptıkları

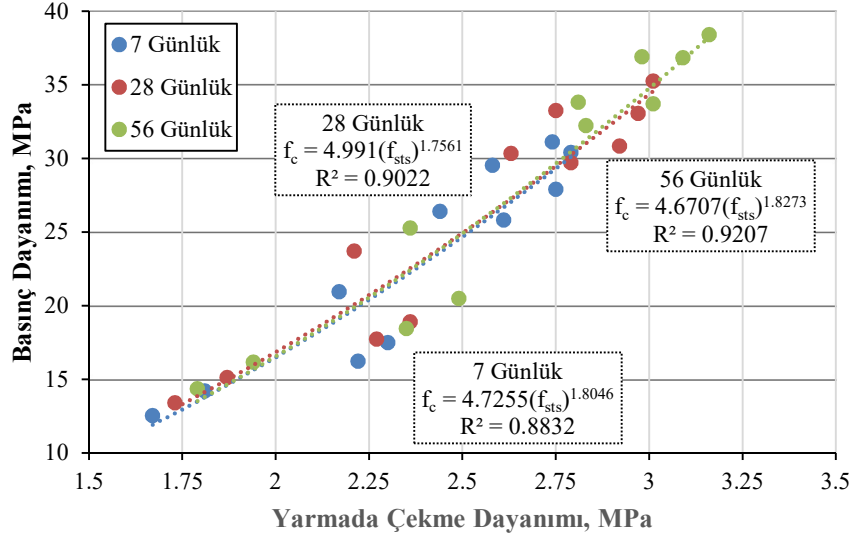
deneysel çalışmada YFC yerine ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında UK ikame ederek alkali ile aktive edilmiş harçlar üretmişlerdir. Ürettikleri harçların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranının UK içeriği ile birlikte arttığını bildirmişlerdir. Oderji vd. (2019) yaptığı çalışmada, UK yerine ağırlıkça %10, %15 ve %20 oranlarında YFC kullanarak alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar üretmişlerdir. Ürettikleri bağlayıcılardaki YFC içeriği ile birlikte  $f_c$  değerlerinin arttığını fakat  $f_{fs}$  değerlerinin azaldığını bildirmişlerdir. Ayrıca, bu durum, UK ile üretilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların oldukça düzensiz ve birbirlerine çapraz bağlı alümina silikatlardan oluşması (Provis ve Deventer, 2014) nedeniyle bağlayıcılardaki boşluk şeklini ve dağılımını etkilemesi ile de açıklanabilir.



Şekil 5.51. Betonların basınç dayanımı ile eğilme dayanımı ilişkisi

### 5.2.12.3 Basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

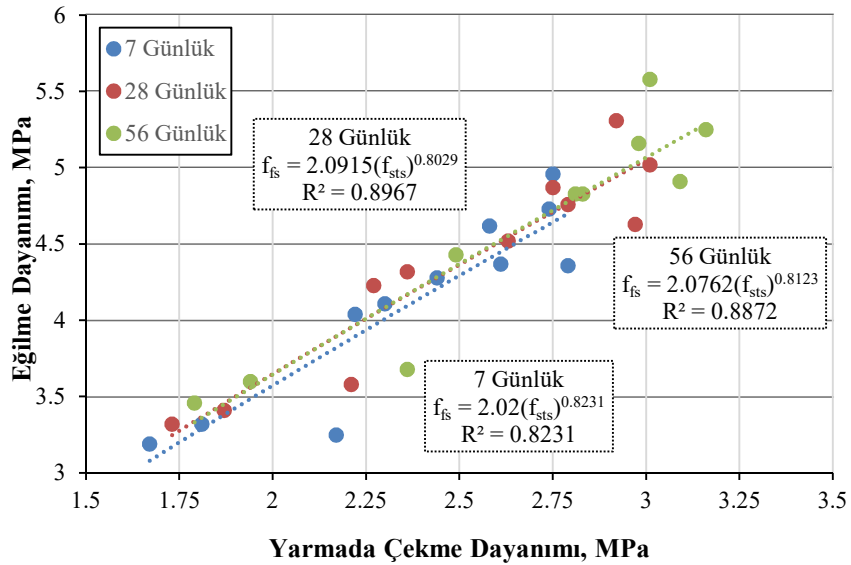
Deneysel çalışmadan elde edilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri Şekil 5.52’de ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.52 incelendiğinde, betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasında yüksek bir üstsel ilişki olduğu görülmüştür. 7 günlük betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerlerinin ilişkilendirilmesi ile elde edilen  $R^2$  değeri 0.88 olmuştur. Ayrıca, bu değer küre yaşı ile birlikte arttığı ve 56 günlük betonlarda 0.92’ye ulaştığı gözlenmiştir. Bu durum,  $f_c$  değeri yüksek olan betonun  $f_{sts}$  değerinin de genellikle yüksek olduğunu,  $f_c$  değeri düşük olan betonun da  $f_{sts}$  değerinin de genellikle düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.52. Betonların basınç dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi

#### 5.2.12.4 Eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Bu çalışmada üretilen betonların 7, 28 ve 56 günlük  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri Şekil 5.53’de ilişkilendirilmiştir. Betonların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasında yüksek bir ilişkinin olduğu görülmüştür. 28 ve 56 günlük betonların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasındaki ilişkinin 7 günlük betonların değerleri arasındaki ilişkiye göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte, 28 günlük betonların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasındaki ilişkinin 56 günlük betonlara göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür.

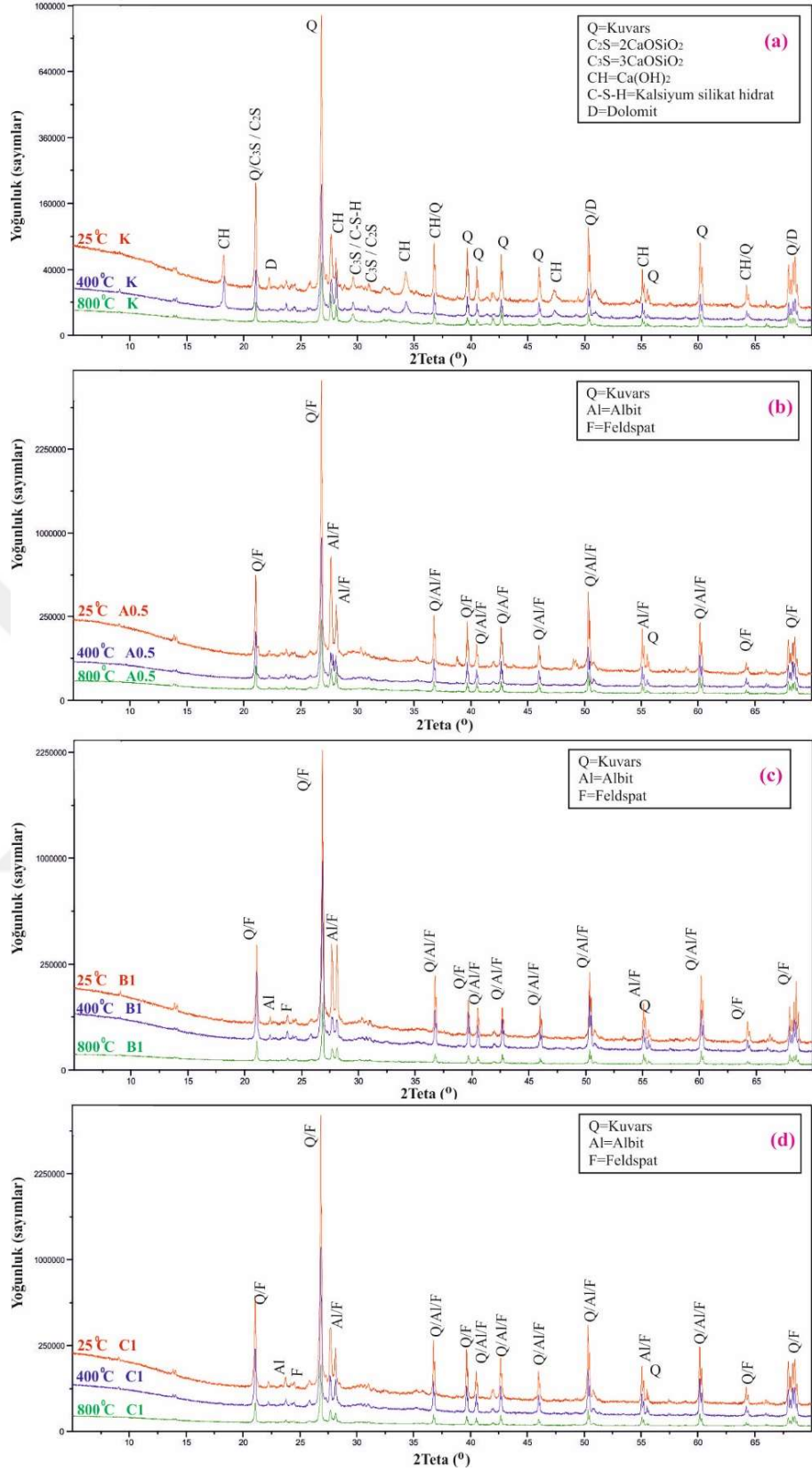


Şekil 5.53. Betonların eğilme dayanımı ile yarmada çekme dayanımı ilişkisi

## 5.3 Mikro Yapı Analizleri

### 5.3.1 Harçlarda mikro yapı analizleri

Kontrol harçları (K) ile 100A/6/0.5 (A0.5), 75A25B/6/1 (B1) ve 50A50B/6/1(C1) kodlu harçlardan alınan toz halindeki örnekler üzerinde gerçekleştirilen XRD analizlerinin sonuçları Şekil 5.54'de sunulmuştur. Kontrol harçlarında bulunan kum XRD analizlerinde kuvars ve dolomit olarak tespit edilmiştir. Kontrol harçlarında bulunan Portland çimentosu ise  $2\text{CaOSiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ),  $3\text{CaOSiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ), kalsiyum hidroksit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) olarak gözlenmiştir. Kontrol harçlarında kuvars ve dolomit için gözlenen XRD piklerinin yoğunlukları yüksek sıcaklığın etkisiyle birlikte azalmıştır.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  için  $2\theta$  18°, 34°, 47° ve 64° de görülen XRD piklerinin yoğunlukları 400°C de azalırken, 800°C de bu XRD pikleri neredeyse kaybolmuştur. Kontrol harçlarında  $2\theta$  21° de  $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$  fazları için görülen XRD piklerinin yoğunlukları yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte kademeli olarak azalmıştır. Kontrol harçlarında  $2\theta$  31° de  $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$  fazları için görülen XRD pikleri ise 800°C de neredeyse kaybolmuştur. 100A/6/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 kodlu harçlarda kullanılan kum XRD analizlerinde kuvars olarak tespit edilmiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçların XRD analizlerinde  $2\theta$  26° de görülen XRD pikleri, bu harçların amorf fazlar içerdiğini göstermektedir (Fang vd., 2018; Lee vd., 2014).  $2\theta$  21°, 26°, 36°, 39°, 41°, 46°, 51°, 56°, 61°, 64° ve 66° da albit ve feldspat için görülen XRD pikleri alkali ile aktive edilmiş harçlarda sodyum alümina silikat hidrat (N-A-S-H), sodyum ilaveli kalsiyum alümina silikat hidrat C-(N)-A-S-H ve kalsiyum alümina silikat hidrat (C-A-S-H) türü jel oluşumlarının varlığına işaret etmektedir. Bu jel oluşumlarının harçlardaki yoğunlukları harçlarda kullanılan bağlayıcı malzeme ve aktivatör içeriğine göre değişebilmektedir. Alkali ile aktive edilmiş harçlarda görülen XRD pikleri yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte azalmıştır. Bununla birlikte, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 kodlu harçların XRD piklerinin yoğunluklarında 400 °C de görülen kayıplar kontrol harçlarına göre daha az olmuştur. 800 °C de ise harçların XRD piklerinin yoğunluklarında benzer değişimler görülmüştür. XRD piklerinde görülen azalma, özellikle 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1 kodlu harçlarda yüksek sıcaklık etkisiyle görülen  $f_c$  artışları ile örtüşmemektedir. Bu durum bu harçlardaki C-A-S-H jelinin yüksek sıcaklıkla bozulması ve aynı zamanda bu harçlardaki UK içeriğine bağlı olarak N-A-S-H jelinin oluşmasıyla açıklanabilir (Park vd., 2016).



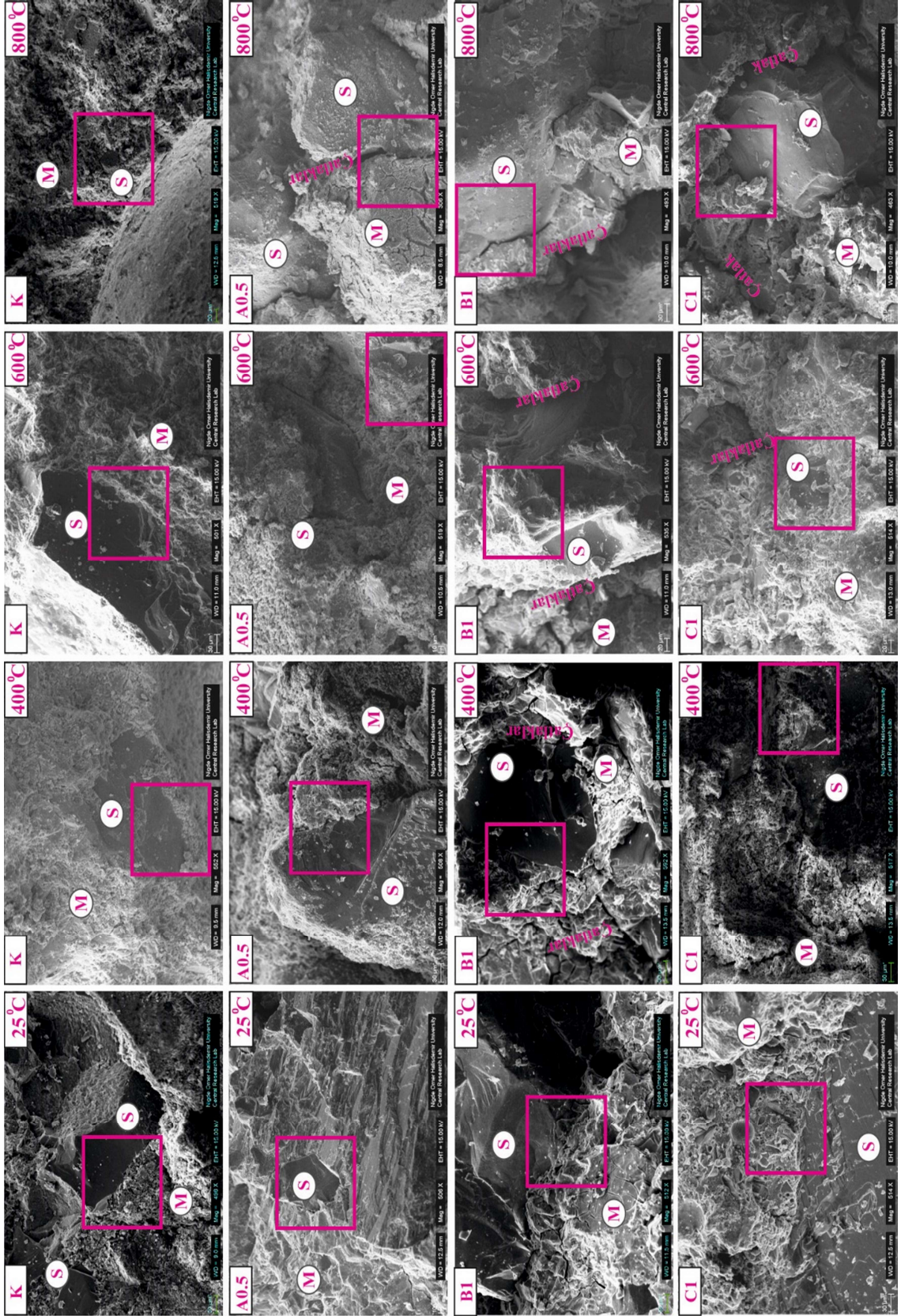
Al: albit, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, CH:Ca(OH)<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S: 2CaOSiO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>S: 3CaOSiO<sub>2</sub>, D:dolomit, F:feldspat, Q: kuvarz.

Şekil 5.54. Harçların XRD analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1



Kontrol harçları (K) ile 100A/6/0.5 (A0.5), 75A25B/6/1 (B1) ve 50A50B/6/1(C1) kodlu harçların SEM analiz sonuçları Şekil 5.55’de sunulmuştur. Ayrıca, Şekil 5.55’deki SEM analizleri üzerinde işaretlenen kare alanlar üzerine yaklaşılarak harçlarda kullanılan kum ile harçların matrisleri arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelen değişimler irdelenmiş ve Şekil 5.56’da sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisiyle kontrol harçlarının matrislerinde ve ara yüzey bölgelerinde bozulmalar ve mikro çatlak oluşumları meydana gelmiştir. Bu bozulmaların ve mikro çatlak oluşumlarının özellikle 800°C de daha belirgin olduğu görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş harçların matrislerinde ise yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan yaklaşık 25 °C de laboratuvar ortamında bekletilenlerde dahi mikro çatlak oluşumları gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak alkali ile aktive edilmiş harçlara uygulanan sıcak kür ortamının neden olduğu şiddetli rötre gösterilebilir. Bununla birlikte, yapılan bir çalışmada, alkali ile aktive edilmiş YFC esaslı bağlayıcılarda çok sayıda mikro çatlak gözlenmesinin bu bağlayıcılar için tipik bir özellik olduğu rapor edilmiştir (Behfarnia ve Shahbaz, 2018). Alkali ile aktive edilmiş harçların matrislerindeki ve ara yüzey bölgelerindeki çatlakların sayısı ve derinliği yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte artmıştır. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş harçlarda kullanılan kum ile harçların matrisleri arasındaki aderans 800°C de azalmıştır.

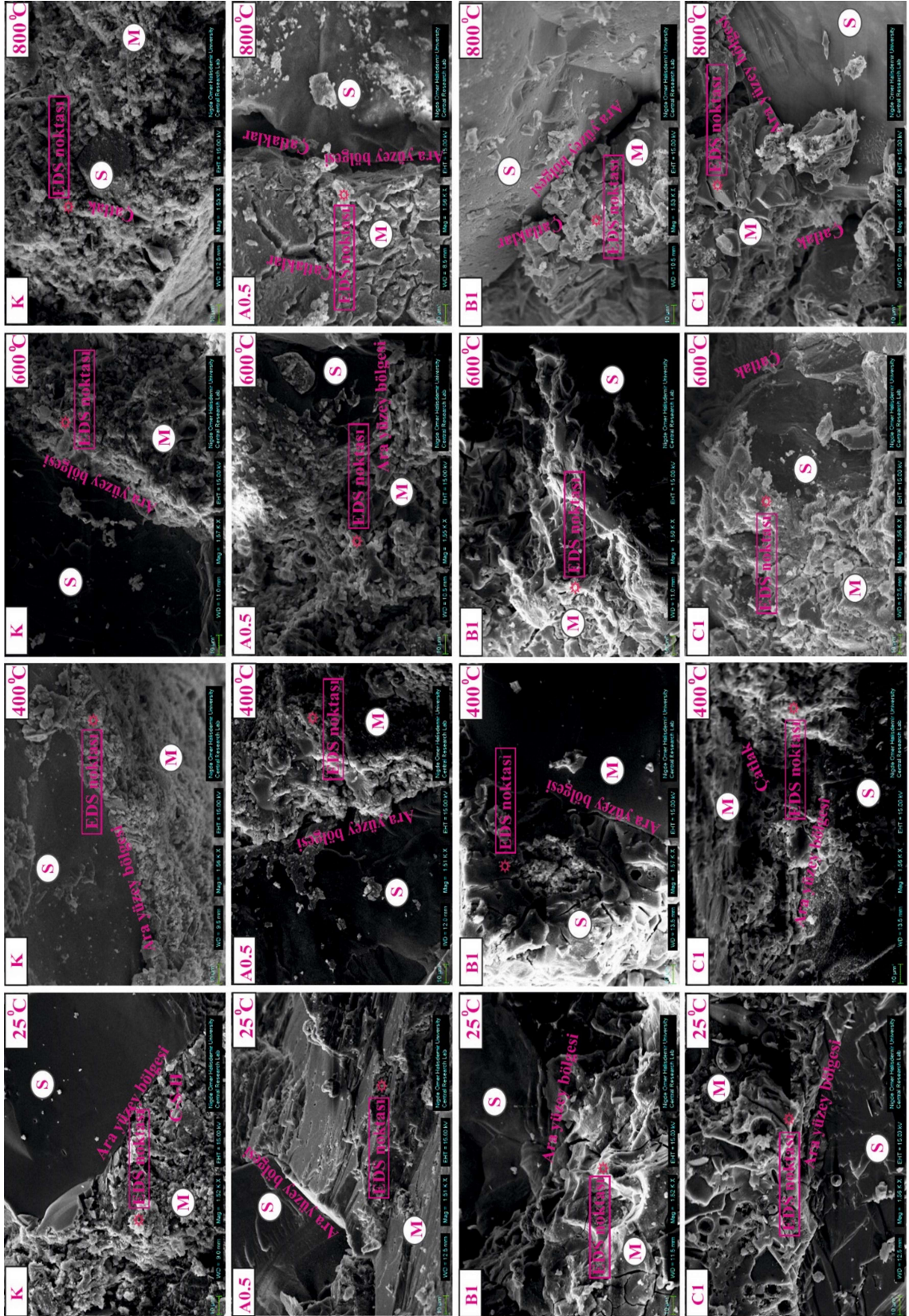
Laboratuvar sıcaklığında bekletilen (25 °C) ve 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol harçları (K) ile 100A/6/0.5 (A0.5), 75A25B/6/1 (B1) ve 50A50B/6/1(C1) kodlu harçlarda Şekil 5.56’da gösterilen noktalar üzerinde gerçekleştirilen EDS analizlerinin sonuçları Şekil 5.57’de sunulmuştur. 25 °C de muhafaza edilen kontrol harçlarında Portland çimentosunun ana elementleri olan Ca, Al, Si, Fe ve O elementlerinin yanında C ve Mg elementleri de görülmüştür. 400 °C de, kontrol harçlarındaki Ca elementinin Si elementine oranı C-S-H jelinin ve özellikle Ca(OH)<sub>2</sub>’in bileşenlerine ayrışması nedeniyle artmıştır. Ayrıca, 25 °C de muhafaza edilen kontrol harçlarında görülen Fe, C ve Mg elementleri yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol harçlarında gözlenmemiştir. Alkali ile aktive edilmiş harçlarda ise alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların temel elementleri olan Ca, Na, Al, O ve Si elementleri gözlenmiştir. Bu elementlerin yanında Nb, K ve Mg elementleri de ayrıca görülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte alkali ile aktive edilmiş harçların matrislerindeki Na içeriğinin arttığı gözlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi ile alkali ile aktive edilmiş harçlardaki Na içeriğinin artması, bu harçlarda sıcaklığın artması ile N-A-S-H jeli oluşumunun devam ettiğini göstermektedir.



M: matris, S:kum.

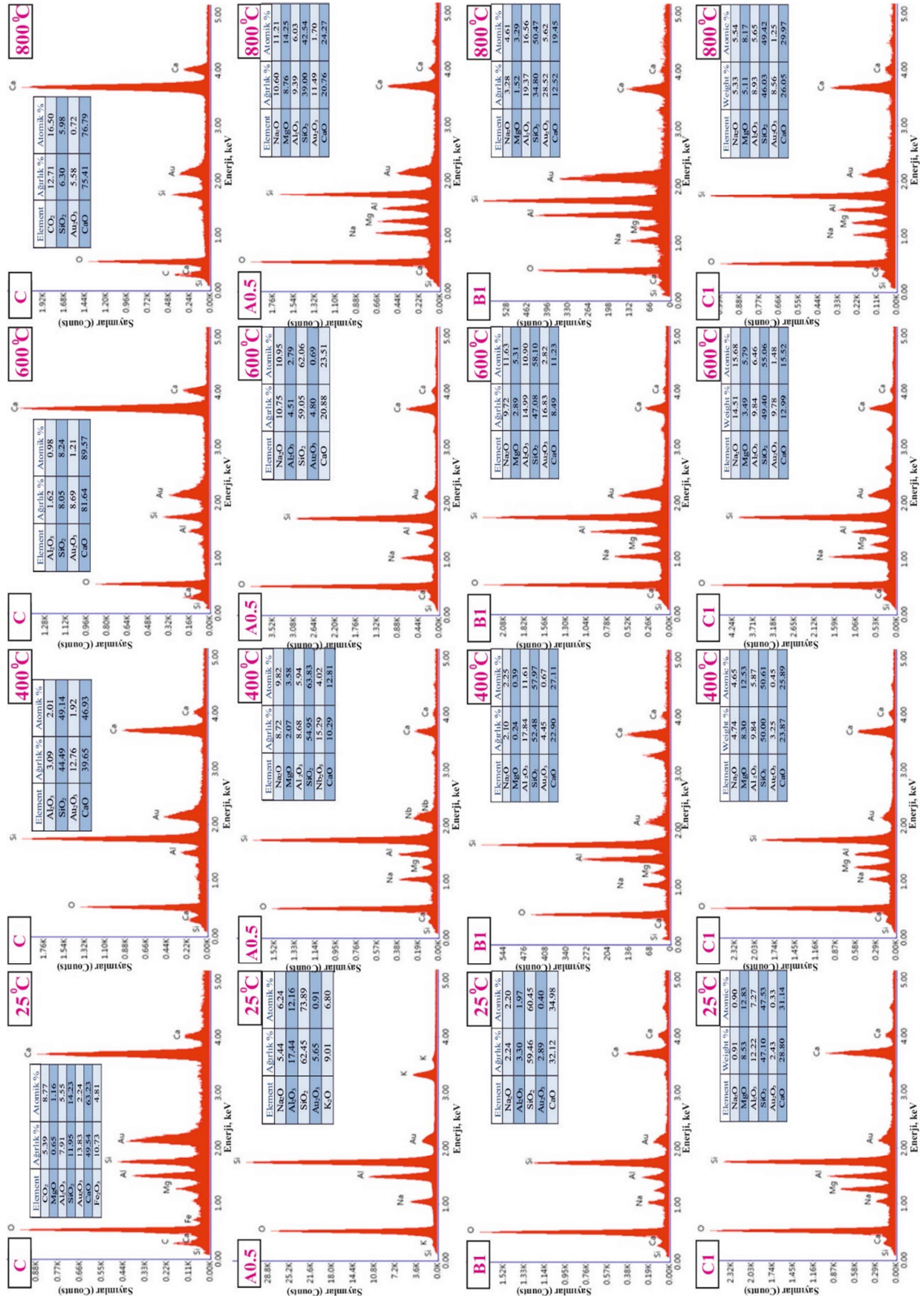
Şekil 5.55. Harçların SEM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1





C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, M: matris, S:kum.

Şekil 5.56. Harçların yakınlştırılmış SEM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1



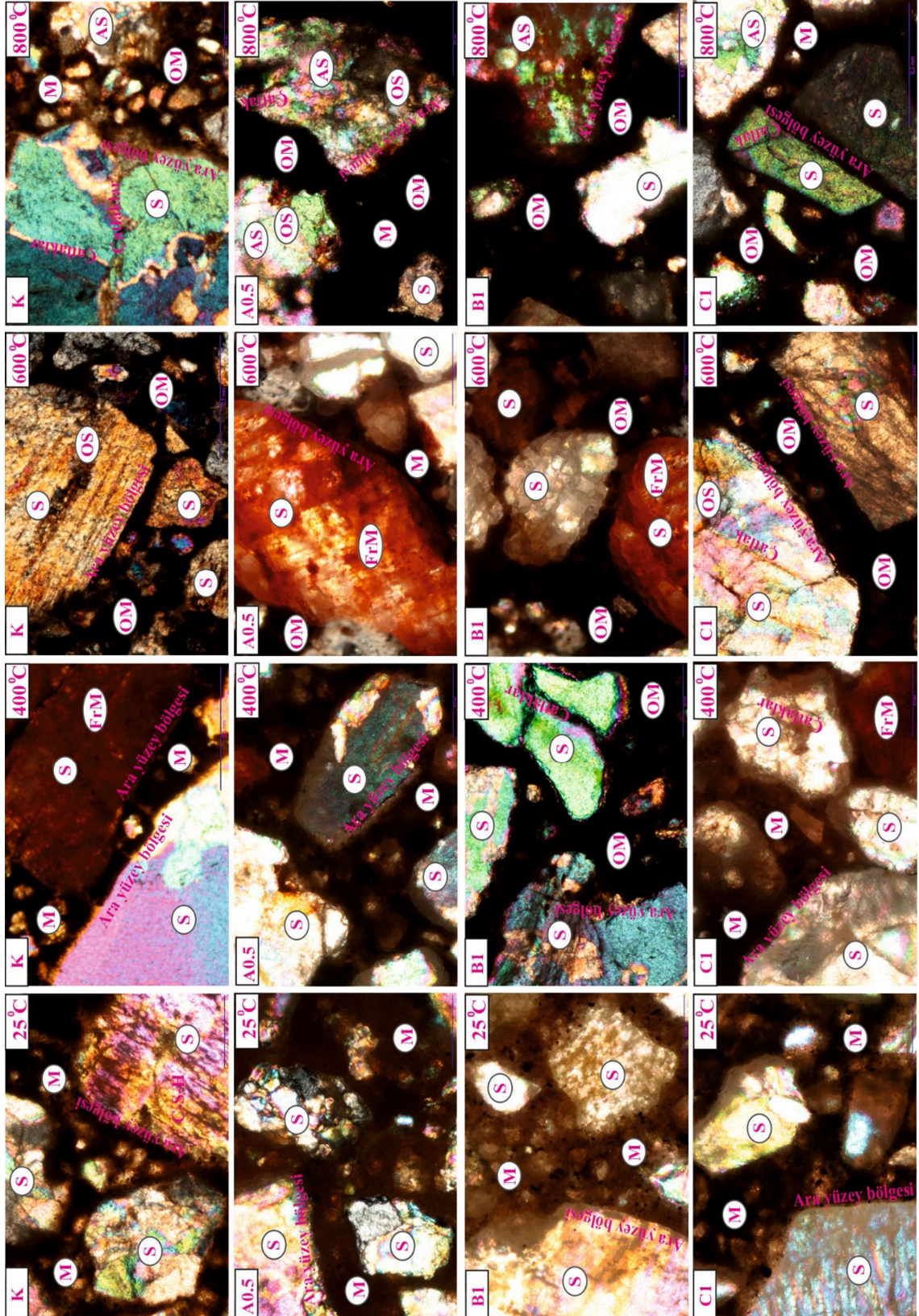
Şekil 5.57. Harçların EDS analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1



Laboratuvarında bekletilen (25 °C) ve 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol harçları (K) ile 100A/6/0.5 (A0.5), 75A25B/6/1 (B1) ve 50A50B/6/1(C1) kodlu harçların PLM analizleri Şekil 5.58’de sunulmuştur. PLM analizleri üzerinde yüksek sıcaklık etkisiyle harçlarda kullanılan kumda, harçların matrislerinde ve kum ile matrisler arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelen değişimler incelenmiştir. Harçlardaki değişimlerin ve bozulmaların sıcaklık arttıkça arttığı görülmüştür. Harçlardaki bozulmalar 400 °C den daha yüksek sıcaklıklarda belirgin hale gelmiştir. Harçlarda kullanılan kum üzerinde 25 °C de çatlak gözlenmezken, yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte kum üzerinde çatlaklar görülmüştür. Bununla birlikte, yüksek sıcaklık etkisiyle kumun yapısında bulunan demirli bileşiklerin bozulmasıyla kumda kırmızı ve pembe lekelerin oluştuğu gözlenmiştir. Harçların ara yüzey bölgesinin 25 °C de sağlam durumda olduğu gözlenmiş, sıcaklık arttıkça harçların matrislerinde ve kumda meydana gelen bozulmalar nedeniyle ara yüzey bölgesinin zayıfladığı tespit edilmiştir.

### 5.3.2 Betonlarda mikro yapı analizleri

Kontrol betonları (K) ile 100A/4/0.5, 75A25B/6/1, 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonlardan alınan toz halindeki örneklerde yapılan XRD analizlerinin sonuçları Şekil 5.59 ve Şekil 5.60’da sunulmuştur. Hafif beton üretimlerinde kullanılan BPA, kontrol betonlarında yapılan XRD analizlerinde anortit-sodian ((Ca,Na)Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) ve klinopiroksen (ABSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub>) (A=Na<sup>+2</sup>, Ca<sup>+2</sup>; B=Fe<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup>, Al<sup>+3</sup>) olarak tespit edilmiştir. Kontrol betonlarında çimento hidratasyon ürünleri olan portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>) ve kalsiyum silikat hidrat jeli (C-S-H, 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O) tespit edilmiştir. Kontrol betonlarında anortit-sodian ve klinopiroksen için görülen XRD piklerinin yoğunluğu yüksek sıcaklık etkisiyle düşmüştür. Şekil 5.60’da yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış olan kontrol betonlarında 18°, 34°, 48° ve 51° de portlandit için görülen XRD piklerinin yoğunlukları sıcaklık arttıkça kademeli olarak düşmüştür. Ayrıca, Şekil 5.60’da kontrol betonlarında amorf C-S-H jeli için 28° de görülen XRD piklerinin yoğunlukları sıcaklığın etkisiyle kademeli olarak azalmıştır. Yapılan XRD analizleri ile alkali ile aktive edilmiş hafif betonlarda kullanılan BPA, 100A/4/0.5 ve 100B/8/1.25 kodlu betonlarda anortit-sodian ve klinopiroksen, 75A25B/6/1 kodlu betonlarda anortit-sodian ve diopsit-potassian (CaMgSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>-KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda ise anortit-sodian, diopsit-potassian ve forsterit (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) ve de 25A75B/6/1.25 kodlu betonlarda anortit-sodian, klinopiroksen ve forsterit olarak tespit edilmiştir.



AS: başkalaşmış kum, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, FrM: ferro magnezyum, M: matris, OM: oksitlenmiş matris, OS: oksitlenmiş kum, S:kum.

Şekil 5.58. Harçların PLM analizleri; K:kontrol, A0.5:100A/6/0.5, B1: 75A25B/6/1, C1:50A50B/6/1

Alkali ile aktive edilmiş betonların XRD analizlerinde görülen albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ), analbit ( $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ), mullit ve feldspat mineralleri ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) bu betonların matrisinde N-C-A-S-H, N-A-S-H ve C-A-S-H jel oluşumlarının meydana geldiğini göstermektedir. Bu jellerin türü ve yoğunluğu bağlayıcı malzeme ve aktivatör içeriğine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılardaki aktif Na içeriği katı veya özellikle sıvı  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  içeriği ile birlikte artmaktadır. Aktif Na içeriğinin artışı ile birlikte alüminyum ve silikon aktif hale gelir ve N-A-S-H jeli oluşumunu sağlar (Xie vd., 2019). N-A-S-H oluşumu ise sodyumun kalsiyum yerine alüminyumu aktif etme potansiyelini artırır. Bu durum ise alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılardaki C-A-S-H jeli miktarının azalmasına ve N-A-S-H jelinin ise artmasına yol açmaktadır. N-A-S-H jel miktarının artması da alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların dayanım gelişimini olumsuz yönde etkiler. (Xie vd., 2019; Huang vd., 2019; Swanton vd., 2016; Puertas vd., 2011).

Yüksek sıcaklık etkisi ile alkali ile aktive edilmiş betonların XRD piklerinin yoğunluklarında azalmalar görülmüştür. Bununla birlikte 400 °C ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan 100A/4/0.5 ve 75A25B/6/1 kodlu betonların XRD piklerinin yoğunluklarında kontrol betonlarına göre daha az düşüş görülürken, 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan bu betonların XRD piklerinde kontrol betonlarına göre daha fazla düşüş gözlenmiştir. 50A50B/6/1.25 kodlu betonların XRD piklerinde 400 ve 600 °C de kontrol betonlarıyla benzer değişim görülürken, 800 °C de bu betonların XRD pikleri kontrol betonlarına göre daha fazla düşüş göstermiştir. 100B/8/1.25 ve 25A75B/6/1.25 kodlu betonların XRD piklerinde ise kontrol betonlarına ve diğer alkali ile aktive edilmiş betonlara göre daha az düşüş görülmüştür.

Kontrol betonları (K) ile 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların SEM analizleri Şekil 5.61’de sunulmuştur. Bununla birlikte, Şekil 5.61’deki SEM analizleri üzerinde işaretlenen kare alanlar üzerine yaklaşarak betonlarda kullanılan BPA malzemesi ile betonların matrisleri arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelen değişimler irdelenmiş ve Şekil 5.62’de sunulmuştur. Kontrol betonları ile 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların SEM analizleri Şekil 5.63’de verilmiştir. SEM analizlerinde, üretilen hafif betonların ve hafif betonlarda kullanılan BPA malzemesinin boşluklu yapıya sahip oldukları görülmüştür. Laboratuvar sıcaklığında (25 °C) kontrol betonlarında mikro çatlak oluşumu gözlenmezken, alkali ile

aktive edilmiş betonların matrislerinin daha boşluklu olduğu ve mikro çatlaklar içerdiği görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda meydana gelen mikro çatlakların oluşum nedeni olarak bu betonlara uygulanan sıcak kürün neden olduğu şiddetli kuruma rötresi gösterilebilir. Alkali ile aktive edilmiş betonlardaki YFC içeriği arttıkça kuruma rötresinin neden olduğu mikro çatlaklar da artmıştır. YFC malzemesi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların yüksek sıcaklık etkisine UK ile üretilenlere göre daha hassas olduğu önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Gao vd., 2016; Lee vd., 2014). Ayrıca, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonlarda aktive olmamış UK tanecikleri görülmüştür. 400 °C sıcaklığa maruz bırakılan kontrol betonların matrisinde portlanditin bozulması nedeniyle boşluklar gözlenmiştir. Kontrol betonlarında sıcaklık 600 °C ye çıktığında ise matriste bozulmalar, mikro çatlak oluşumları ve boşluklar gözlenmiştir. Ayrıca, kontrol betonlarının matrislerinde meydana gelen bozulmalar ve BPA ile bu betonların matrisi arasındaki ara yüzeydeki çatlaklar sıcaklığın etkisiyle artmış 800 °C de çok daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca, 800 °C sıcaklıkta C-S-H jellerinde de bozulmalar gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda ise yüksek sıcaklığın etkisiyle birlikte bu betonların matrislerindeki çatlaklar daha da derinleşmiştir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkla birlikte BPA ile bu betonların matrisi arasındaki ara yüzeyde çatlaklar gözlenmiş, sıcaklık arttıkça da çatlak derinliği artmıştır.

Kontrol betonları (K) ile 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların matrislerinde ve bu betonlardaki BPA malzemesi üzerinde SEM analizleri üzerinde işaretlenen noktalarda yapılan EDS nokta analizlerinin sonuçları sırasıyla Şekil 5.64 ve Şekil 5.65’de verilmiştir. Kontrol betonları ile 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların SEM analizleri üzerinde işaretlenmiş noktalarda gerçekleştirilen EDS analizleri ise Şekil 5.66’da sunulmuştur. Kür havuzunda yaklaşık 25 °C de bekletilen kontrol betonlarında Portland çimentolu bağlayıcıların ana elementleri olan Ca, Al, Si, Fe ve O tespit edilmiştir. Bu elementler Portland çimentosunun hidratasyon ürünleri olan portlandit ile C-S-H jelinin yapısında bulunmaktadır. Bu elementlerle birlikte kontrol betonlarında K, Fe ve Mg elementleri de görülmüştür. Kontrol betonları yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında matrislerindeki Ca elementinin Si elementine oranı genellikle artmıştır. Bu artışın ana nedeni olarak portlanditin 400 °C den itibaren bileşenlerine ayrışması gösterilebilir. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda ise ana elementler olarak Na, Ca, Al, O ve Si elementleri gözlenmiştir. Alkali ile aktive edilmiş hafif betonların matrislerindeki Ca yüzdesi bu betonlardaki UK içeriği ile birlikte

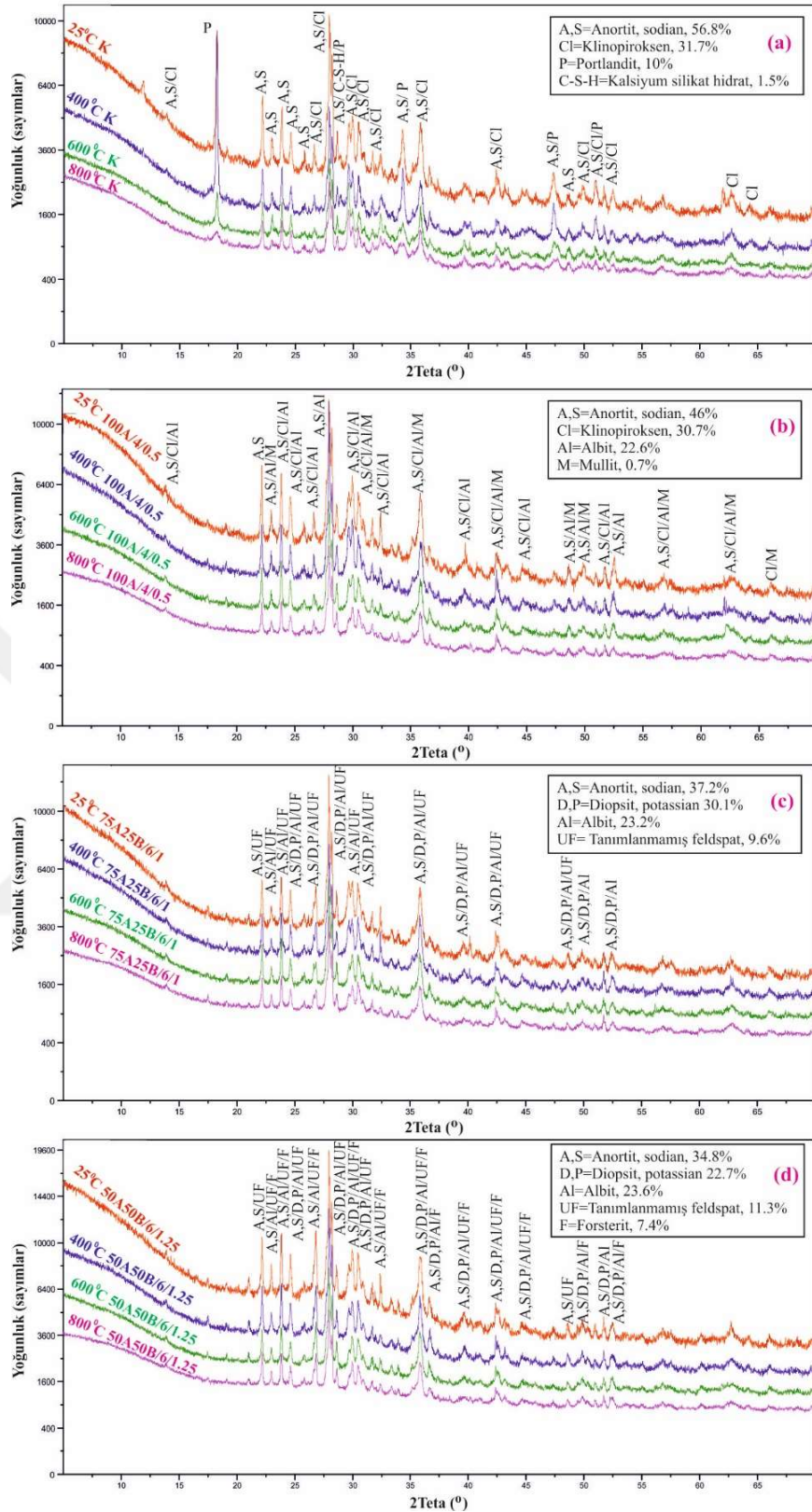


azalmıştır. Bunun nedeni olarak UK ve YFC malzemelerinin alkaliler ile aktive edilmesi sonucu oluşan jel yapılarındaki Ca yüzdesinin birbirlerinden farklı olması gösterilebilir. Özellikle 100B/8/1.25 kodlu betonlardaki çok düşük Ca yüzdesi, bu betonlarda N-A-S-H jeli oluşumunu işaret etmektedir. Ayrıca, 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonların matrislerindeki Na yüzdesi yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte artmıştır. Bu betonlarda artan Na yüzdesi ise sıcaklık artışı ile birlikte devam eden N-A-S-H jeli oluşumunu işaret etmektedir. Ayrıca, betonlardan alınan örneklerden daha yüksek çözünürlükte görüntü alınabilmesi amacıyla altın kaplaması yapılması nedeniyle betonlarda Au elementi de görülmüştür. Kontrol betonlarında kullanılan BPA malzemesi üzerinde gerçekleştirilen EDS nokta analizlerinde Na elementi çok az görülmüş veya hiç görülmemiştir. Bununla birlikte, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda kullanılan BPA malzemelerinde kontrol betonlarına göre daha fazla Na içeriği gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak alkali ile aktive edilmiş betonlarda kullanılan aktivatörlerin BPA malzemesi içerisine sızması gösterilebilir. Kontrol betonlarında kullanılan BPA malzemesindeki Ca içeriğinin 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda kullanılan BPA malzemelerindeki Ca içeriğine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise Portland çimentosunun BPA malzemesi içerisine difüzyonu gösterilebilir. Ayrıca, EDS nokta analizlerinde yüksek sıcaklık etkisinin BPA malzemesinin kimyasal içeriğine belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kontrol betonları (K) ile 100A/4/0.5, 75A25B/6/1, 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonlardan alınan ince kesitler üzerinde gerçekleştirilen PLM analizlerinin sonuçları Şekil 5.67 ve Şekil 5.68’de sunulmuştur. PLM analizleri ile yüksek sıcaklık etkisiyle betonların matrislerinde, betonlarda kullanılan BPA malzemesinde ve BPA malzemesi ile betonların matrisleri arasındaki ara yüzey bölgesinde meydana gelen değişimler irdelenmiştir. Kontrol betonlarında kullanılan Portland çimentosu ile BPA malzemesinin etkileşim halinde olduğu görülmüştür. 100A/4/0.5, 75A25B/6/1, 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonlarda farklı oranlarda kullanılan YFC ve UK malzemeleri ile aktivatörlerin hem birbirleri ile hem de BPA malzemesinin tozunda bulunan mikrolit mineralleriyle etkileşim göstermiştir. Bu etkileşimler sonucunda ince kesitler üzerinde de görülen beton matrislerinin renklerinde ve genel görünümünde renk değişiklikleri gözlenmiştir. BPA malzemesinin boşluklu yapısından dolayı beton karışımlarında kullanılan bağlayıcı malzemeler ile BPA

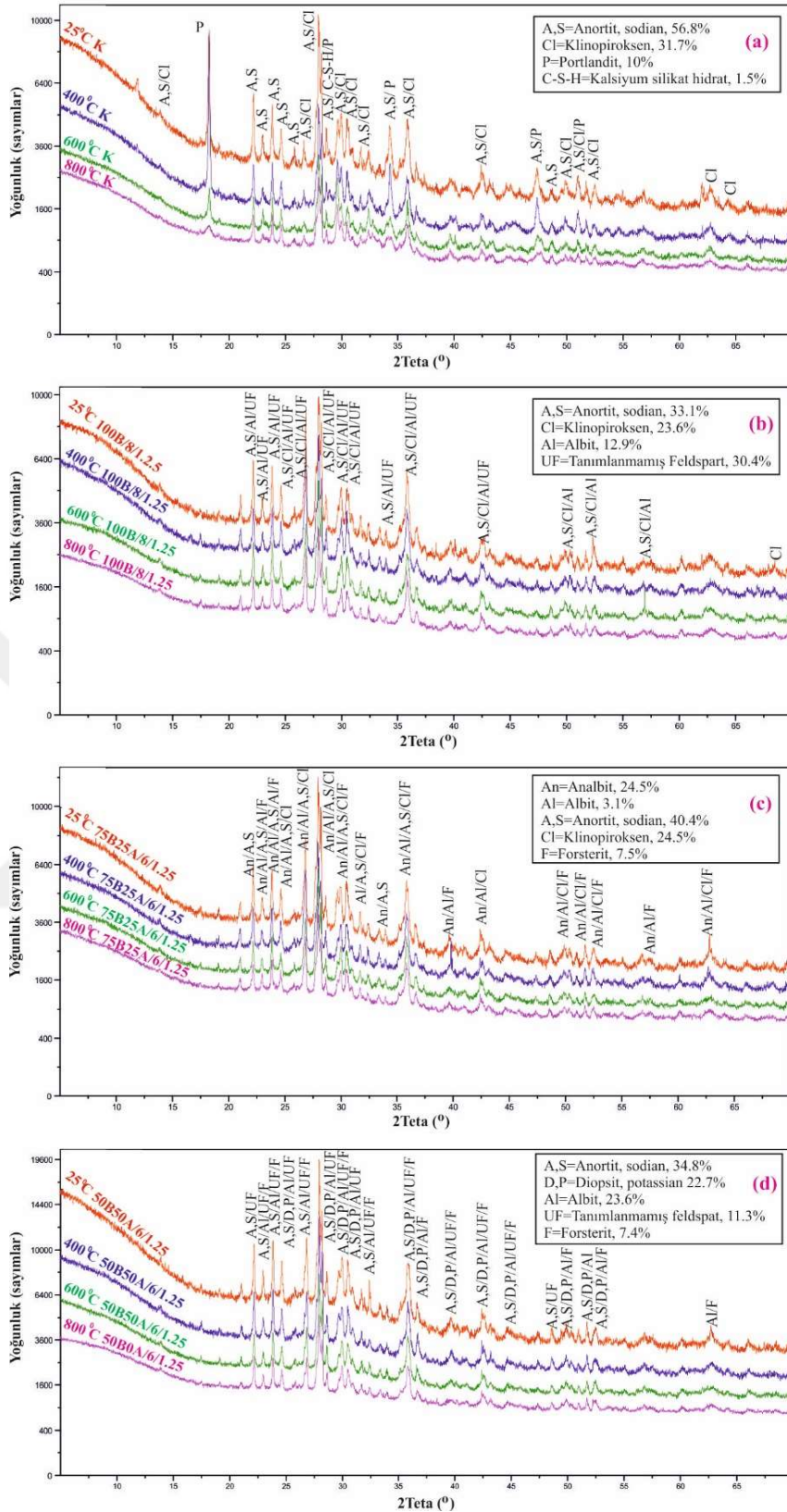
malzemesi arasındaki ara yüzey bölgesinde sıkı bir bağ oluşumu gözlenmiştir. Betonlarda kullanılan BPA malzemesi sarı, turuncu, kırmızı, kahverengi ve siyah olmak üzere farklı renklerde gözlenmiştir. Bu renk farklılığının nedeni olarak BPA malzemesinin farklı kimyasal içeriklerde olması gösterilebilir. PLM analizlerinde de görüldüğü gibi BPA malzemesi genel olarak k-feldspat, kuvars, piroksen, plajiolaz ve opak minerallerinden oluşmaktadır. Ayrıca, BPA malzemesinin farklı renklerde görünmesinde bu malzemede fenokristal şeklinde bulunan olivin, piroksen, biyotit ve hornblent gibi ferromagnezit mineralleri de etkili olmuştur. Bu mineraller BPA malzemesinde birlikte veya ayrı ayrı bulunabilmektedir.

Betonlardan alınan ince kesitler üzerinde yapılan PLM analizlerinde volkanik kökenli BPA malzemesinin yapısında boşluklar bulunduğu ve bu malzemenin porfirik bir dokuya sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, PLM analizi için ince kesit alınan tüm betonların matrislerinde ortam sıcaklığında (25 °C) makro boyutta çatlak oluşumu görülmemiştir. 400 °C sıcaklık etkisi sonrasında, BPA malzemesinde ve ara yüzey bölgesinde ortam sıcaklığına göre önemli bir değişim gözlenmemiştir. Ancak, 400 °C ye maruz bırakılan 100A/4/0.5 kodlu betonların matrisinde şiddetli rötreden kaynaklı olarak makro çatlak oluşumu gözlenmiştir. 600 °C de ise tüm betonların matrislerinde yüksek sıcaklık etkisinden dolayı renk değişimleri görülmüştür. Bu sıcaklıkta matrislerde gözlenen renk değişimlerine ek olarak 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonların matrislerinde ve ara yüzey bölgelerinde çatlak oluşumları gözlenmiştir. Sıcaklık 800 °C ye çıktığında ise tüm betonların matrislerinde ve ara yüzey bölgelerinde çatlakların daha da arttığı ve çatlakların genişlediği gözlenmiştir. 600 °C de matrislerinde ve ara yüzey bölgelerinde çatlak oluşumu görülen 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25 kodlu betonlardaki çatlak sayısı ve genişliği 800 °C de belirgin bir şekilde artmıştır. Benzer şekilde 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan tüm betonların matrislerinde bozulmalar ve renk değişimlerinde de artışlar gözlenmiştir. 800 °C sıcaklığa maruz bırakılan tüm betonların ince kesitlerinde bu betonlarda kullanılan BPA malzemesinin bünyesinde bulunan boşlukların arttığı ve genişlediği görülmüştür. Bu durum betonların mikro yapılarını ve dayanımlarını olumsuz etkilemiştir.



A, S: anortit, sodian, Al: albit, Cl: klinopiroksen, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, D, P: diopsit, potassian, F: forsterit, M: mullit, P: portlandit, S: UF: tanımlanmamış feldspat.

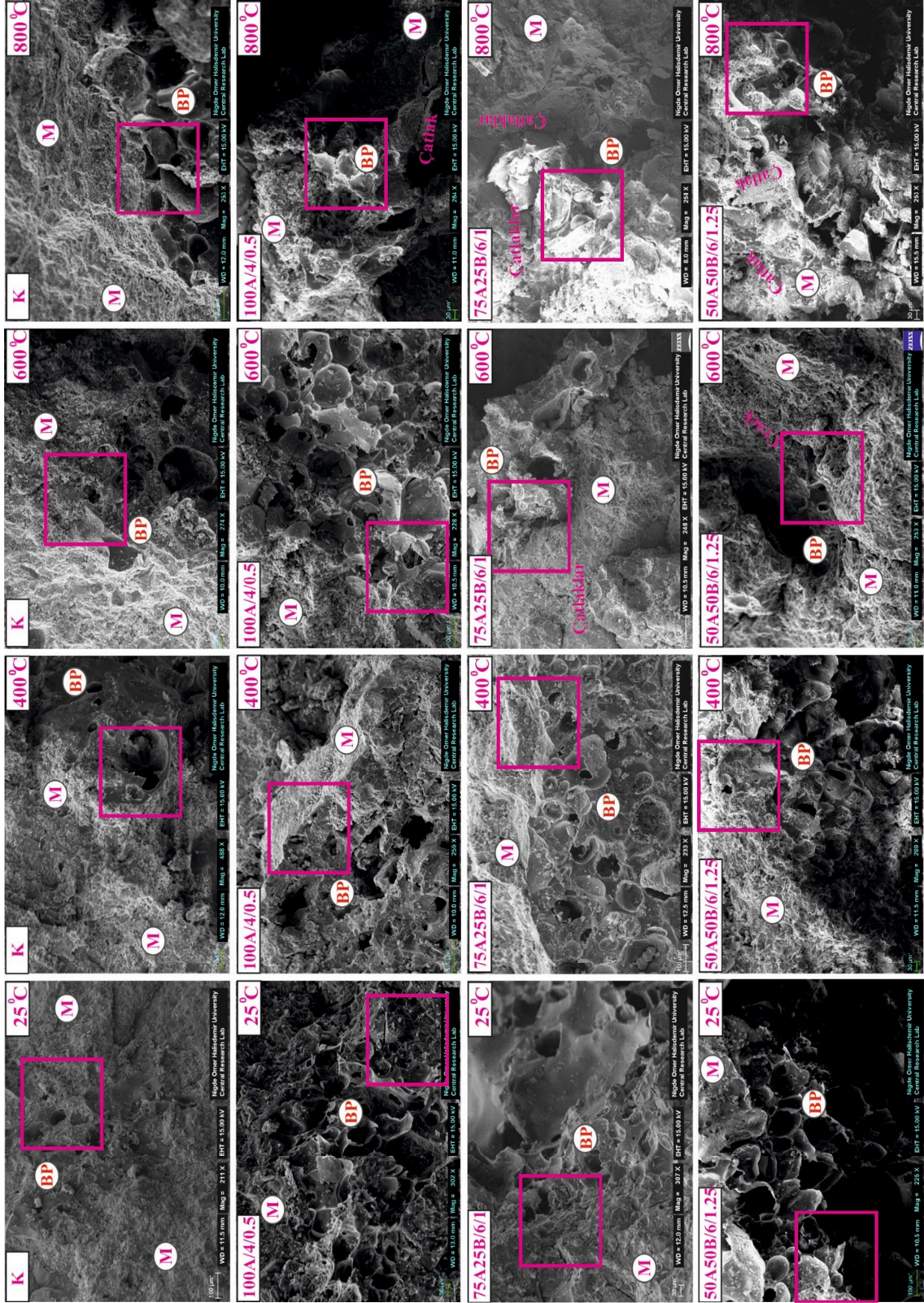
Şekil 5.59. Betonların XRD analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25



A, S:anortit, sodian, Al: albit, An: analbit Cl: klinopiroksen, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, D, P: diopsit, potassian, F: forsterit, M: mullit, P:portlandit, UF: tanımlanmamış feldspat.

**Şekil 5.60.** Betonların XRD analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25

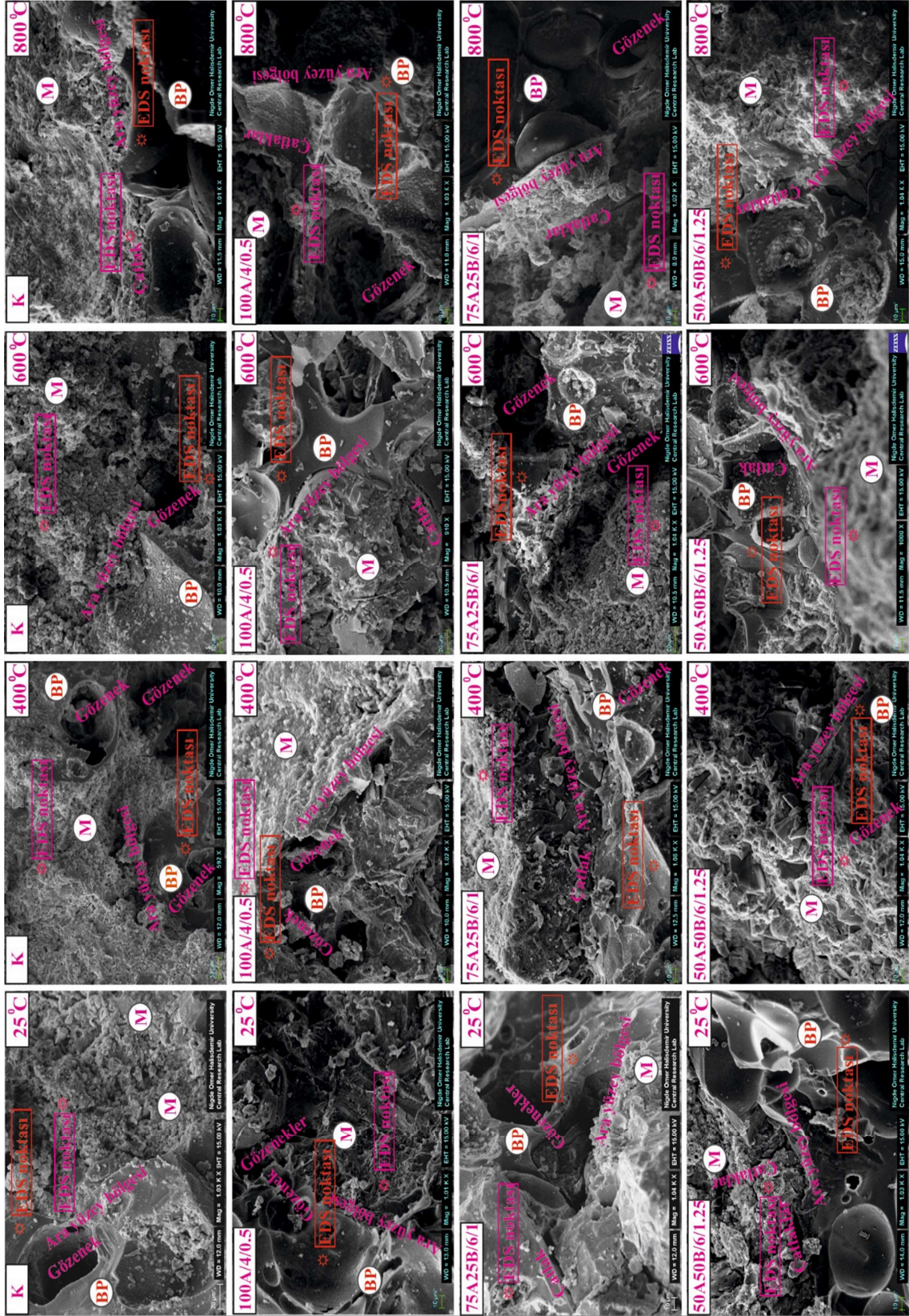




BP:bazık pomza, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, M: matris.

Şekil 5.61. Betonların SEM analizleri; K: kontrol,100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25

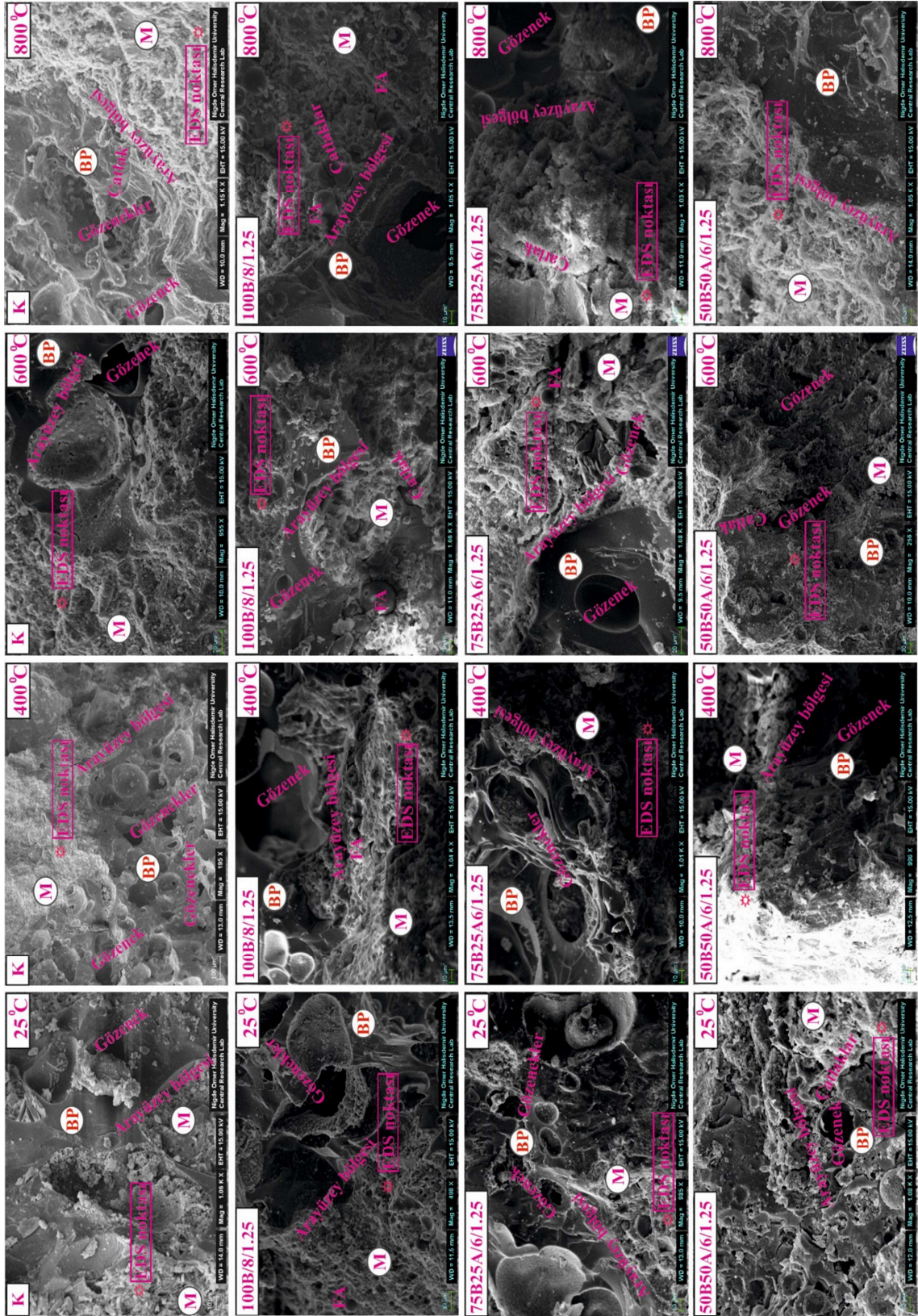




BP: bazık pomza, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, M: matris, EDS: enerji dağılım spektrometresi.

Şekil 5.62. Betonların yakınlaştırılmış SEM analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25

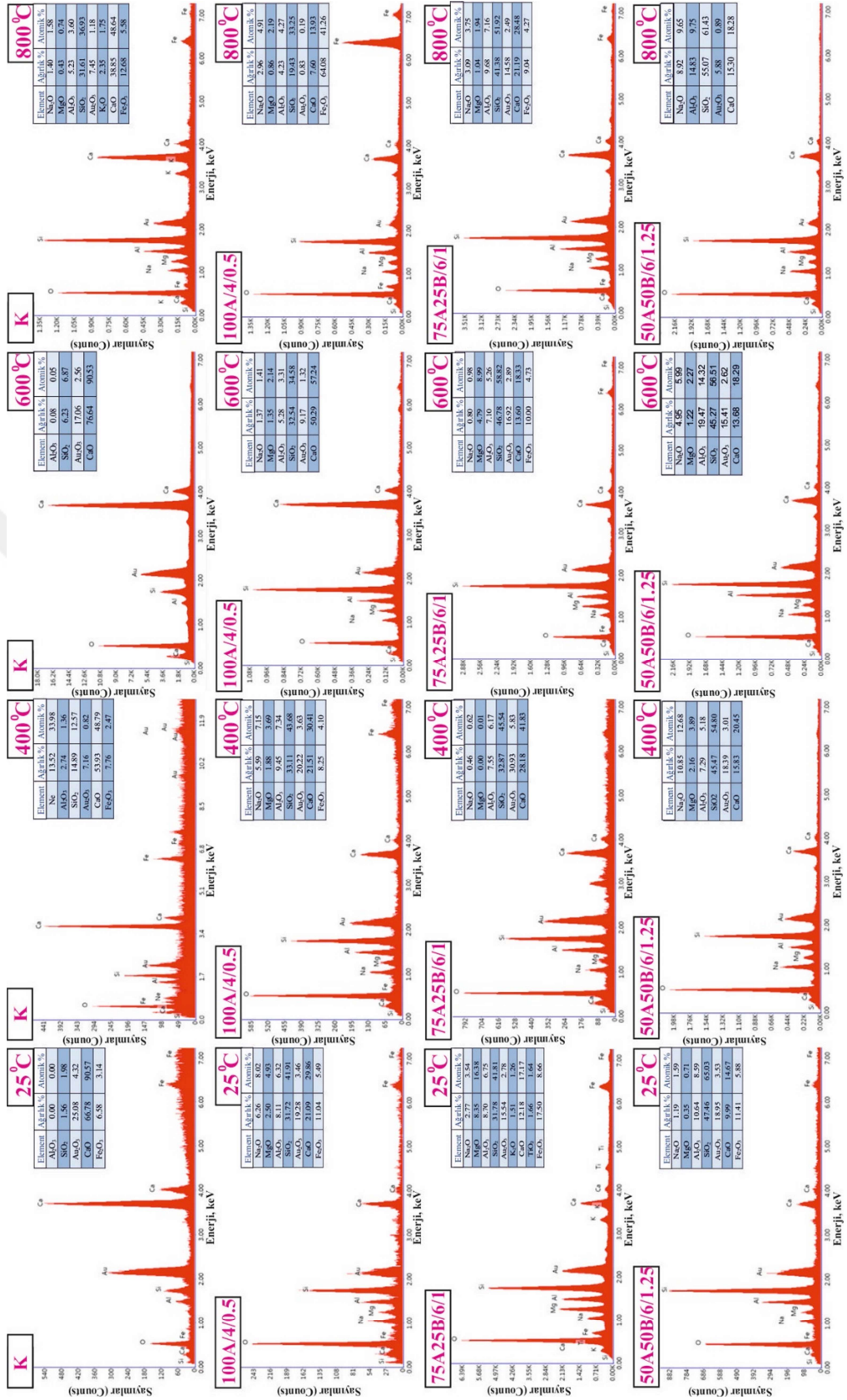




BP: bazık pomza, C-S-H: kalsiyum silikat hidrat, FA: uçucu kül, M: matris, EDS: enerji dağılım spektrometresi.

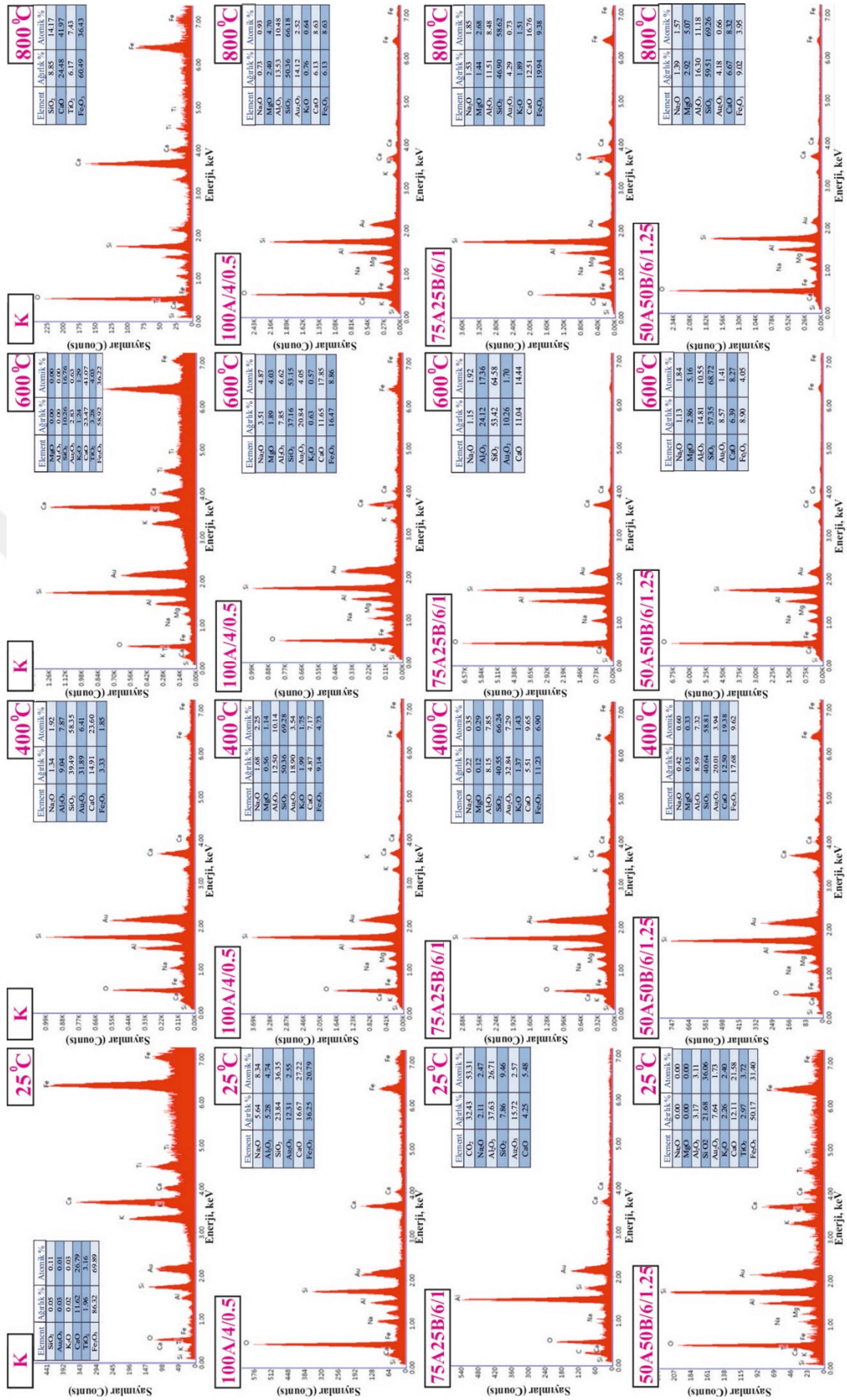
Şekil 5.63. Betonların SEM analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25





Şekil 5.64. Betonların matrislerinin EDS analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1

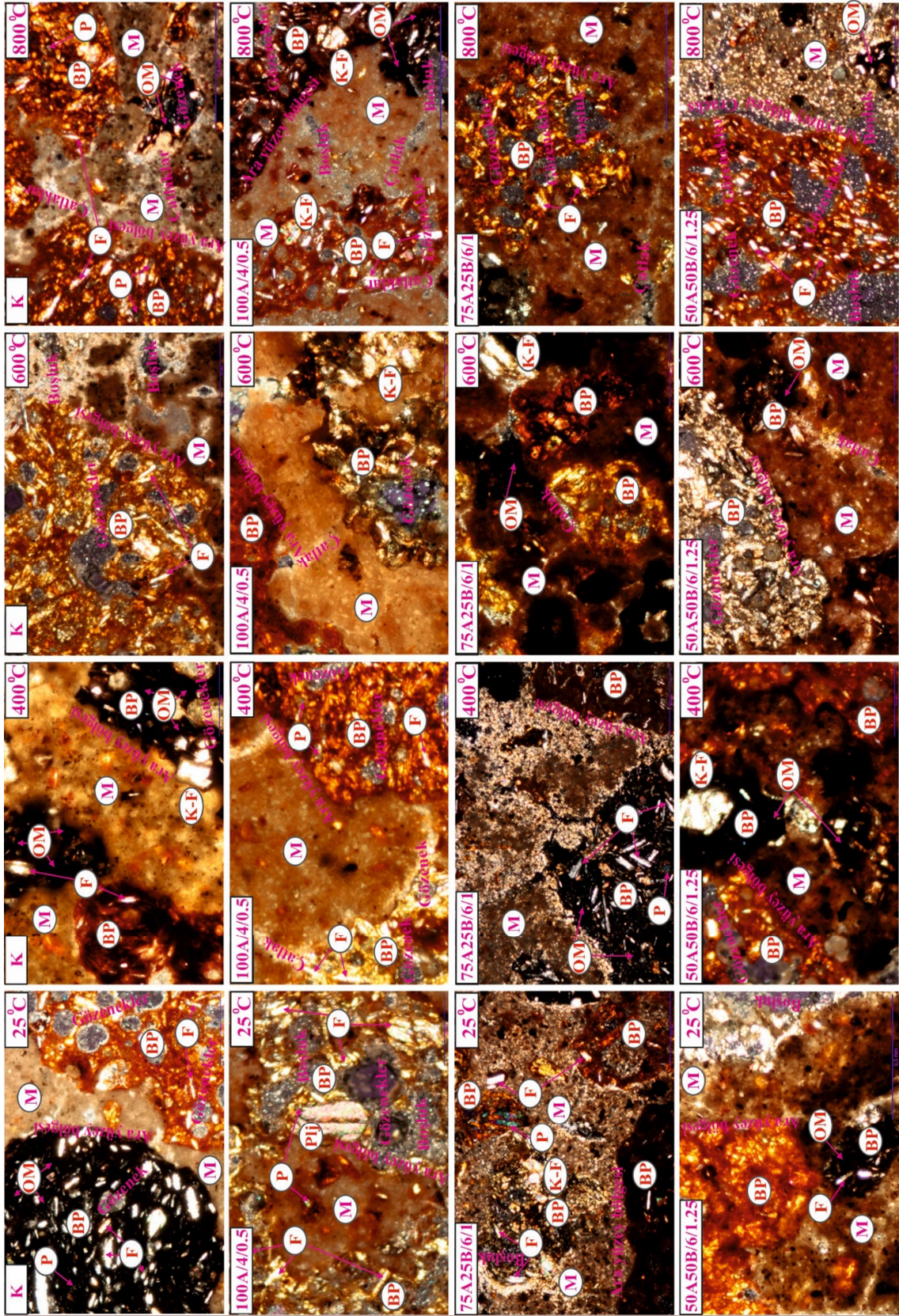




Şekil 5.65. Betonlardaki BPA malzemesinin EDS analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1



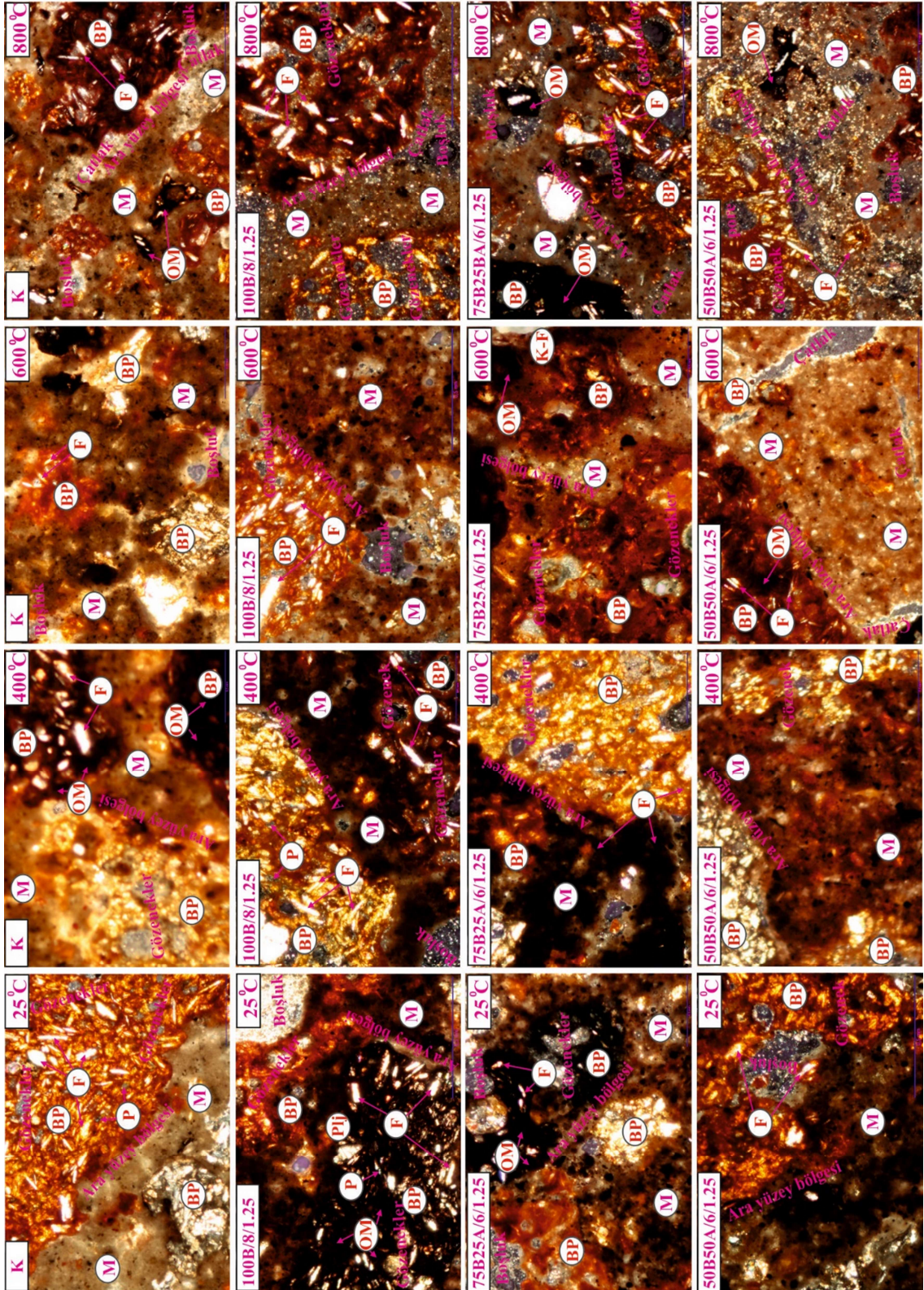




BP: bazık pomza, K-F: k-feldspat, F: feldspat, M: matris, OM: oksitlenmiş matris, P: piroksen, Plj: plajiyoklaz.

Şekil 5.67. Betonların PLM analizleri; K: kontrol, 100A/4/0.5, 75A25B/6/1 ve 50A50B/6/1.25





BP: bazık pomza, K-F: k-feldspat, F: feldspat, M: matris, OM: oksitlenmiş matris, P: piroksen, Plj: plajiyoklaz.

Şekil 5.68. Betonların PLM analizleri; K: kontrol, 100B/8/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 50A50B/6/1.25

## BÖLÜM VI

### SONUÇLAR

Bu doktora çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Alkali ile aktive edilmiş harçların birim ağırlıklarının kontrol harçlarına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir. Karışımlarda UK içeriği arttıkça harçların birim ağırlıkları genellikle azalmıştır. Na konsantrasyonu ve Ms modülü harçların birim ağırlıkları üzerinde belirgin bir etki oluşturmamıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş harçlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 100A ve 100B serisi harçlarda görülmüştür. Bununla birlikte, kontrol harçlarından daha yüksek  $U_{pv}$  değerleri yalnızca 100A/4/0.5, 100A/6/0.5 ve 100B/8/1.25 kodlu harçlardan elde edilmiştir.
- Kontrol harçlarına göre 100A ve 75A25B serisi harçların  $f_{fs}$  değerleri daha düşük iken, 50A50B/6/1, 25A75B/6/1.25, 25A75B/6/1, 25A75B/6/0.75, 25A75B/8/1.25, 100B/6/1.5, 100B/6/1.25, 100B/8/1.25 ve 100B/8/1 kodlu harçların  $f_{fs}$  değerleri kontrol harçlarına göre daha yüksek elde edilmiştir.
- Deneysel çalışmada, kontrol harçlarına göre alkali ile aktive edilmiş harçlardan sadece %4 Na içeren 100A serisi harçlar ile 100A/6/0.5, 100A/6/0.75 ve 100B/8/1.25 kodlu harçların  $f_c$  değerleri daha yüksek elde edilmiştir.
- Alkali ile aktive edilmiş harçların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranı genellikle karışımlarda kullanılan UK içeriği ile birlikte artmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş harçların  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri Na konsantrasyonlarına göre farklılık göstermiştir. 100A serisi harçlarda en yüksek  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerine %4 Na ile üretilen harçlarda ulaşılırken, 100B serisi harçlarda ise %8 Na ile üretilen harçlarda ulaşılmıştır. İkili bağlayıcı madde karışım (YFC ve UK) ile üretilen harçlarda ise en yüksek  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri %6 Na içeren karışımlarda görülmüştür.
- Harçların  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri Ms modülüne göre de farklılık göstermiştir. Buna göre, 100A serisi harçlarda en yüksek  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri Ms modülü 0.5 olan harçlarda gözlenirken, 100B serisi harçlarda ise Ms modülü 1.25 olan harçlarda gözlenmiştir. YFC ve UK bağlayıcı malzemelerinin beraber kullanıldığı harç karışımlarında ise en uygun Ms modülü değerinin (bu iki bağlayıcı malzemelerin aktive oldukları Ms modüllerinin yaklaşık ortalama değeri) 1 olduğu görülmüştür.

İkili karışımda YFC içeriği arttıkça en uygun Ms modülü değerinin düştüğü, UK içeriği arttıkça ise en uygun Ms modülü değerinin arttığı gözlenmiştir.

- Alkali ile aktive edilmiş harçlar ile kontrol harçlarının  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri kür sürelerinin artmasıyla birlikte genellikle artmıştır.
- Harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri seri seri ve tüm seriler beraber olmak üzere ilişkilendirilmiştir. Harçların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasında oldukça yüksek bir korelasyon olduğu görülmüştür. Bu durumu şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır. Ayrıca,  $R^2$  değerlerinin 1'e yakın olması harçların  $f_c$  ile  $U_{pv}$  değerleri arasında yüksek bir ilişkinin varlığını göstermektedir.
- Harçların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri de seri seri ve tüm seriler beraber olmak üzere ilişkilendirilmiştir. Her bir seri ayrı ayrı değerlendirildiğinde; harçların 7 günlük  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasındaki ilişkinin harçlardaki UK içeriği ile birlikte genellikle arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte, harçların 28 ve 56 günlük  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasında yüksek bir ilişki olduğu görülmüştür. Tüm seriler birlikte değerlendirildiğinde ise harçların tamamının  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_c$  değerleri arasındaki korelasyon, her bir serideki harçların değerleri arasındaki korelasyona göre oldukça düşük çıkmıştır.
- Kontrol harçlarının  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerleri yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte kademeli olarak azalırken, %6 Na içeren 75A25B ve 50A50B serisi harçların  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerinde 600 °C sıcaklığa kadar deney öncesine göre önemli bir kayıp görülmemiştir.
- Kontrol harçları ile %6 Na içeren 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçlar içerisinde yüksek sıcaklık etkisi ile en fazla  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değer kaybı kontrol harçlarında görülmüştür.
- Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan %6 Na içeren 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçlarda UK içeriği arttıkça harçların birim ağırlıklarında,  $U_{pv}$ ,  $f_{fs}$  ve  $f_c$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kayıplar azalmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş harçların XRD piklerinin yoğunlukları yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte kademeli olarak azalmıştır.
- Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçların mikro yapılarındaki bozulmalar ile mikro çatlak derinliği ve sayısının sıcaklık arttıkça arttığı SEM analizlerinde görülmüştür. Çatlak derinliği ve sayısındaki artış, alkali ile aktive edilmiş harçlarda kontrol harçlarına göre daha fazla olmuştur.



- Kontrol harçlarının matrislerinin Ca/Si oranının ve %6 Na içeren 100A, 75A25B ve 50A50B serisi harçların matrislerindeki Na oranının sıcaklık artışı ile birlikte arttığı EDS analizlerinde görülmüştür.
- Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçların matrislerinde ve bu harçlarda kullanılan kumda yüksek sıcaklık etkisi ile çatlama, bozulma, oksitlenmeler ile renk değişimleri PLM analizlerinde görülmüştür.
- Alkali ile aktive edilmiş betonların çökme değerlerinin (100A/4/0.5 kodlu betonlar dışında) kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş betonların çökme değerleri Na içeriğinin artması ile birlikte azalmıştır. Ayrıca, Ms modülünün betonların çökme değerleri üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.
- Alkali ile aktive edilmiş betonların taze birim ağırlık değerlerinin kontrol betonlarına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriğinin artması ile birlikte taze birim ağırlık değerlerinde azalma görülmüştür.
- Alkali ile aktive edilmiş betonların sertleşmiş birim ağırlıklarının kontrol betonlarına göre %10'a varan oranlarda daha düşük olduğu görülmüştür. Alkali ile aktive edilmiş betonların sertleşmiş birim ağırlıkları UK içeriğinin artması ile birlikte azalmıştır. Kontrol betonlarının sertleşmiş birim ağırlıkları kür yaşı ile birlikte azalırken, alkali ile aktive edilmiş betonların birim ağırlıklarında kür yaşının önemli bir etkisi olmamıştır. Bunun nedeni kontrol betonları ile alkali ile aktive edilen betonların farklı kür ortamlarında bekletilmesidir.
- Alkali ile aktive edilmiş 100A/6/0.5 kodlu betonlar hariç, alkali ile aktive edilmiş betonların su emme değerleri kontrol betonlarına göre daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, karışımlardaki UK içeriğinin artması ile birlikte betonların su emme kapasiteleri de genellikle artmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş betonların kılcal yolla su emme değerleri kontrol betonlarına göre daha yüksek elde edilmiştir. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş betonların UK içeriği arttıkça genellikle kılcal yolla emilen su miktarında artmış görülmüştür.
- Kontrol betonlarının birincil ve ikincil su emme katsayıları alkali ile aktive edilmiş betonlara göre daha düşük elde edilmiştir. En yüksek birincil su emme

katsayısı 100B/6/1.5 kodlu betonlarda, en yüksek ikincil su emme katsayısı ise 25A75B/6/1.25 kodlu betonlarda görülmüştür.

- 100A/4/0.5 ve 100A/6/0.5 kodlu betonlar hariç alkali ile aktive edilmiş betonların  $U_{pv}$  değerlerinin kontrol karışımına göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte alkali ile aktive edilmiş betonlarda en yüksek  $U_{pv}$  değerleri 100A/6/0.5 kodlu betonlarda, en düşük  $U_{pv}$  değerleri ise 100B/6/1.5 kodlu betonlarda görülmüştür. Ayrıca, karışımlarda UK içeriğinin artması betonların  $U_{pv}$  değerlerini genellikle azaltmıştır.
- Bu çalışmada üretilen betonlarda en yüksek  $f_{fs}$  değerleri 50A50B/6/1.25 kodlu betonlarda görülürken, en düşük  $f_{fs}$  değerleri 100B/6/1.5 kodlu betonlarda gözlenmiştir. Bununla birlikte, UK içeriğinin artması ile birlikte alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_{fs}$  değerleri genellikle azalmıştır. Ayrıca, betonların  $f_{fs}$  değerleri kür yaşı ile birlikte artmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş betonlarda en yüksek  $f_c$  değerleri 75A25B/6/1 kodlu betonlardan elde edilirken, en düşük  $f_c$  değerleri 100B/6/1.5 kodlu betonlardan elde edilmiştir. Ayrıca, kontrol betonlarına göre 75A25B/6/1 kodlu betonların  $f_c$  değerlerinin %21'e varan oranlarda daha yüksek olduğu, 100B/6/1.5 kodlu betonlarının  $f_c$  değerlerinin ise kontrol betonlarına göre %56'ya varan oranlarda daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, betonların  $f_c$  değerleri kür yaşı ile birlikte artmıştır.
- Alkali ile aktive edilmiş betonların UK içeriğinin artması ile birlikte betonların  $f_{fs}$  değerlerinin  $f_c$  değerlerine oranı alkali ile aktive edilmiş harçlarda olduğu gibi genellikle artmıştır.
- Bu çalışmada, en yüksek  $f_{sts}$  değerleri 75A25B/6/1 ve 75A25B/6/0.75 kodlu betonlardan elde edilmiştir. Bu betonların  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonuna göre sırasıyla %12'ye ve %9'a varan oranlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük  $f_{sts}$  değerleri ise 100B/6/1.5 kodlu betonlarda görülürken, bu betonların  $f_{sts}$  değerlerinin kontrol betonlarına göre %38'e varan oranlarda daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, betonların  $f_{sts}$  değerleri kür yaşı ile birlikte %7 ile %15 oranları arasında artmıştır.
- Kontrol betonları ile 100A ve 75A25B serisi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerleri asit etkisinde önemli derecede azalmıştır. Alkali ile aktive edilmiş betonlarda UK içeriği arttıkça asit etkisi nedeniyle  $f_c$  değerlerinde



meydana gelen kayıplar genellikle azalmıştır. Ayrıca, 25A75B ve 100B serisi betonlarda asit etkisi deney öncesine göre  $f_c$  kaybına neden olmamış, hatta  $f_c$  değerlerinde farklı oranlarda artışa neden olmuştur.

- Alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında asit etkisi nedeniyle meydana gelen değişimler  $f_c$  değerlerindeki değişimlerle benzerlik göstermiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonların UK içeriği arttıkça, asit etkisi nedeniyle betonların ağırlıklarında meydana gelen kayıplar daha az olmuştur.
- 75A25B/6/1 kodlu betonlar hariç alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinde sülfat etkisi nedeniyle meydana gelen kayıplar kontrol betonlarına göre daha az olmuştur. Sülfat etkisi nedeniyle alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen değişimler üzerinde Ms modülünün belirgin bir etkisi olmamıştır. Bununla birlikte, sülfat etkisindeki alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerleri üzerinde bağlayıcı malzeme içeriğinin de belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.
- Kontrol betonlarının ağırlıklarında sülfat etkisinde %1 ile %2 arasında değişen oranlarda kayıplar görülürken, alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında ise %0.05 ile %2 arasında artışlar meydana gelmiştir. Alkali ile aktive edilmiş betonların ağırlıklarında meydana gelen artışlarda bağlayıcı malzeme içeriğinin, Ms modülünün, sülfat çözeltisi derişimine veya sülfat çözeltisine maruz kalma süresinin belirgin bir etkisi görülmemiştir. Ayrıca, kontrol betonlarının sülfat etkisi nedeniyle  $f_c$  değerleri ile ağırlıklarında meydana gelen değişimler birbirleri ile benzerlik gösterirken, bu benzerlik alkali ile aktive edilmiş betonlarda görülmemiştir.
- Kontrol betonlarının  $f_c$  değerleri yüksek sıcaklık etkisiyle azalmış, bu kayıplar 800 °C'de %58'e ulaşmıştır. 100A ve 75A25B serisi ile üretilen alkali ile aktive edilmiş betonların  $f_c$  değerlerinde kontrol betonlarıyla benzer değişimler görülmüştür. 50A50B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kayıplar kontrol betonlarında gerçekleşen kayıplara göre daha az olmuştur. 400°C sıcaklıkta 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde farklı oranlarda artışlar olmuştur. Ayrıca, 600 °C ve 800 °C sıcaklıkta 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerlerinde meydana gelen kayıplar diğer betonlara göre daha az olmuştur.

- Alkali ile aktive edilmiş betonlarda yüksek sıcaklık etkisi ile meydana gelen ağırlık kayıpları kontrol betonlarına göre daha az olmuştur. Ayrıca, yüksek sıcaklık etkisiyle 100B ve 25A75B serisi ile üretilen betonların  $f_c$  değerleri ile ağırlıklarında meydana gelen değişimler birbirleriyle örtüşmezken, diğer betonların  $f_c$  değerleri ile ağırlık kayıplarında meydana gelen kayıplar birbirleri örtüşmektedir.
- Bu çalışmada üretilen betonların  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  ve  $f_{fs}$  değerleri arasında yüksek sayılabilecek bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{fs}$  değerleri arasındaki korelasyonun,  $f_c$  değerleri ile  $U_{pv}$  değerleri arasındaki korelasyona göre daha düşük olduğu görülmüştür.
- Betonların  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasında çok yüksek bir ilişki gözlenmiştir. Ayrıca, betonların  $f_{fs}$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasında  $f_c$  değerleri ile  $f_{sts}$  değerleri arasındaki kadar olmasa da yüksek bir ilişki vardır. Bu durumu şekiller üzerinde verilen  $R^2$  değerleri doğrulamaktadır.
- Hafif betonların XRD piklerinin yoğunlukları yüksek sıcaklık etkisiyle birlikte azalmıştır. Bununla birlikte, alkali ile aktive edilmiş betonların UK içeriği arttıkça XRD piklerinde yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan kayıplar genellikle azalmıştır.
- Hafif betonlar üzerinde gerçekleştirilen SEM analizleri üzerinde yüksek sıcaklık etkisiyle hafif betonların mikro yapılarında bozulmalar ve değişimler gözlenmiştir. Ayrıca, bu analizlerde yüksek sıcaklık nedeniyle betonlardaki mikro çatlak ve gözenek sayısının arttığı gözlenmiştir.
- Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kontrol betonlarının matrislerindeki Ca elementinin Si elementine oranı genellikle artmıştır.
- Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan alkali ile aktive edilmiş hafif betonların matrislerindeki Ca yüzdesi karışımlarda kullanılan UK içeriği artışına paralel olarak azalmıştır.
- Yüksek sıcaklık etkisi ile 50A50B/6/1.25, 25A75B/6/1.25 ve 100B/8/1.25 kodlu betonların matrislerindeki Na içeriği genellikle artmıştır.
- PLM analizlerinde hafif betonların matrislerinde, beton karışımlarında kullanılan BPA malzemesinde ve BPA ile matris arasındaki ara yüzey bölgesinde yüksek sıcaklık etkisiyle bozulmalar, oksitlenmeler ve renk değişimleri gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

ACI Committee 213R-03, Guide for structural lightweight aggregate concrete, *American Concrete Institute*, ACI, 2003.

ACI Committee 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, *American Concrete Institute*, ACI, 1987.

Adam, A.A., Strength and durability properties of alkali activated slag and fly ash-based geopolymer concrete, Doctoral Thesis, *Environmental and Chemical Engineering RMIT University*, Melbourne, Australia, 2009.

Aguilar, R. A., Díaz, O. B. and García, J.I. E., “Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates”, *Construction and Building Materials* 24, 1166–1175, 2010.

Aiken, T.A., Kwasny, J., Sha, W. and Soutsos, M.N., “Effect of slag content and activator dosage on the resistance of fly ash geopolymer binders to sulfuric acid attack”, *Cement and Concrete Research* 111, 23-40, 2018.

Aitcin, P-C., “Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow”, *Cement and Concrete Research* 30, 1349–1359, 2000.

Aktaş, B., Çelik lifli hafif beton ile imal edilmiş betonarme kirişlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 2007.

Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E. and Ehrlacher, A., “The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste”, *Cement and Concrete Research* 35(3), 609-613, 2005.

Alexander, M. and Mindess, S., Aggregates in concrete modern concrete technology series, *Taylor and Francis e-Library*, USA, 2010.

Alkaya, D., Uçucu kül katkısının dolgu zeminlerin stabilitesine etkisi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2002.

Alkaya, Ş., Hafif beton üretiminde organik atıkların (ayçiçeği sapı) kullanılabilirlikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekirdağ, 2010.

Allen, A.J., Thomas, J.J. and Jennings, H.M., “Composition and density of nanoscale calcium–silicate–hydrate in cement”, *Nature Materials* 6, 311–316, 2007.

Allouche, K.K.-P.E.N., “Examination of chloride-induced corrosion in reinforced geopolymer concretes”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 25(10), 1465–1476, 2013.

Alonso, C. and Fernandez, L. “Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments”, *Journal of Materials Science* 39(9), 3015-3024, 2004.

Altun, C.M., Hafif beton, harç ve çimento hamurunda kırılma parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2005.

Arbi, K., Palomo, A. and Jiménez, A.F., “Alkali-activated blends of calcium alüminate cement and slag/diatomite”, *Ceramics International* 39, 9237–9245, 2013.

Arısoy, B. and Wu, H. C., “Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA”, *Construction and Building Materials* 22, 635–645, 2008.

Aruntaş, H.Y., Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1996.

ASTM C138/C138M-17a, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, *ASTM International*, 2017.

ASTM C1585-13, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, *ASTM International*, 2013.

ASTM C330/C330M, Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete, *ASTM International*, 2014.

ASTM C597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, *ASTM International*, 2009.

ASTM C618-17a, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *ASTM International*, 2017.

Aydın, S., “A ternary optimization of mineral additives of alkali activated cement mortars”, *Construction and Building Materials* 43, 131–138, 2013.

Aydın, S. and Baradan. B., “Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars”, *Composites: Part B* 57, 166–172, 2014.

Babae, M. and Castel, A., “Chloride-induced corrosion of reinforcement in lowcalcium fly ash-based geopolymer concrete”, *Cement and Concrete Research* 88, 96-107, 2016.

Badar, M. S., Kupwade-Patil, K., Bernal, S.A., Provis, J.L. and Allouche, E.N., “Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes”, *Construction and Building Materials* 61, 79–89, 2014.

Bakharev, T., “Durability of Geopolymer Materials in Sodium and Magnesium Sulfate Solutions,” *Cement and Concrete Research* 35(6), 1233–1346, 2005.

Bakharev, T., Sanjayan, J. G., Cheng, Y.-B., “Alkali activation of Australian slag cements”, *Cement and Concrete Research* 29, 113–120, 1999.

Bakharev, T., Sanjayan, J.G. and Cheng, Y.-B., “Sulfate attack on alkali-activated slag concrete”, *Cement and Concrete Research* 32, 211–216, 2002.

Balaguru, P. and Dipsia, M.G., “Properties of fiber-reinforced high-strength semi lightweight Concrete” *ACI Materials Journal* 90(5), 399–405, 1993.

Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, A. and Leung, A.Y.T., “Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete”, *Building and Environment* 37, 1361–1367, 2002.

Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun Felekoğlu, K., Aydın, S., Yardımcı, M.Y., Topal, A. ve Öztürk, A. U., Beton, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları* No: 334, İzmir, 2012.

Bayülke, N., Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı, *İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi*, İzmir, 1998.

Behfarnia, K. and Rostami, M., “Effects of micro and nanoparticles of SiO<sub>2</sub> on the permeability of alkali activated slag concrete”, *Construction and Building Materials* 131, 205–213, 2017.

Behfarnia, K. and Shahbaz, M., “The effect of elevated temperature on the residual tensile strength and physical properties of the alkali-activated slag concrete”, *Journal of Building Engineering* 20, 442-454, 2018.

Bentli, İ., “Diatomitin endüstride kullanımı ve çevresel önemi”, *3.Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, s.191-199, Ankara, 2009.

Bentli, İ., “Kütahya-Alayunt diatomit cevherindeki safsızlıkların hidrosiklon ve kalsinasyonla giderilmesi”, *Madencilik* 49:(3), 13-21, 2010.

Bernal, S. A., Provis, J. L., Walkley, B., San Nicolas, R., Gehman, J. D., Brice, D. G., Kilcullen, A., Duxson, P., and van Deventer, J. S. J., “Gel Nanostructure in Alkali-Activated Binders Based on Slag and Fly Ash, and Effects of Accelerated Carbonation,” *Cement and Concrete Research* 53, 127–144, 2013.

Bernal, S.A., de Gutierrez, R.M., Provis, J.L. and Rose, V., “Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags”, *Cement and Concrete Research* 40(6), 898–907, 2010a.

Bernal, S., Gutierrez, R.D., Delvasto, S. and Rodriguez, E., “Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers”, *Construction and Building Materials* 24, 208–214, 2010b.

Bernal, S.A., Provis, J.L., de Mejía Gutierrez, R. and Rose, V., “Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends”, *Cement and Concrete Composites* 33 (1), 46–54, 2011a.

Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R., Pedraza, A.L., Provis, J.L., Rodriguez, E.D. and Delvasto, S., “Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes”, *Cement and Concrete Research* 41 (1), 1–8., 2011b.

- Bernal, S.A., Mejía de Gutiérrez, R. and Provis, J.L., “Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends”, *Construction and Building Materials* 33, 99–108, 2012a.
- Bernal, S.A., Rodríguez, E.D., Mejía de Gutiérrez, R. and Provis, J.L., “Performance of alkali activated slag mortars exposed to acids”, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* 1, 138–151, 2012b.
- Bernal, S.A. and Provis, J.L., “Durability of Alkali-Activated Materials: “Progress and Perspectives”, *Journal of the American Ceramic Society* 97 (4), 997–1008, 2014.
- Bernal, S. A., San Nicolas, R., Myers, R. J., Mejia de Gutierrez, R., Puertas, F., van Deventer, J. S. J. and Provis, J. L., “MgO Content of Slag Controls Phase Evolution and Structural Changes Induced by Accelerated Carbonation in Alkali-Activated Binders,” *Cement and Concrete Research* 57, 33–43, 2014a.
- Bernal, S.A., Provis, J.L., Mejía de Gutiérrez, R. and van Deventer, J.S.J., “Accelerated carbonation testing of alkali-activated slag/metakaolin blended concretes: effect of exposure conditions”, *Materials and Structures* 48 (3), 653–669, 2014b.
- Bernal, S.A., “Effect of the activator dose on the compressive strength and accelerated carbonation resistance of alkali silicate-activated slag/metakaolin blended materials”, *Construction and Building Materials* 98, 217–226, 2015.
- Bilim, C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2006.
- Bilim, C., Karahan, O., Atis, C. D. and Ilkentapar, S., “Effects of Chemical Admixtures and Curing Conditions on some Properties of Alkali-Activated Cementless Slag Mixtures”, *KSCE Journal of Civil Engineering* 19(3), 733-741, 2015.
- Bilim, C., Karahan, O., Atiş, C. D. and Ilkentapar, S., “Influence of admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars subjected to different curing conditions”, *Materials and Design* 44, 540-547, 2013.
- Buchwald, A., Kaps, C. and Hohmann, M., “Alkali-activated binders and pozzolan cement binders complete binder reaction or two sides of the same story”, *11th*

*International Conference on the Chemistry of Cement*, Durban, South Africa, 1238–1246, 2003.

CEB, Fatigue of Concrete Structures, State of the Art Report, *CEB Bulletin d'Information* No.108, Lausanne, pp. 300, 1988.

CEB/FIP, Manual of Lightweight Aggregate Concrete Design and Technology No. 121, *Comité Euro-International du Béton (CEB)*, Great Britain, 1977.

Chandra, S. and Berntsson, L., Lightweight aggregate concrete: science, technology and applications, *William Andrew Publishing*, New York, 2002.

Chaparro, W.A., Ruiz, J.H.B. and Gómez, R.d.J.T., “Corrosion of reinforcing bars embedded in alkali-activated slag concrete subjected to chloride attack”, *Materials Research* 15(1), 57–62, 2012.

Chen, B. and Liu, J., “Experimental application of mineral admixtures in lightweight concrete with high strength and workability”, *Construction and Building Materials* 22, 655–659, 2008.

Chindapasirt, P., Rattanasak, U. and S. Taebuanhuad, “Resistance to Acid and Sulfate Solutions of Microwave-Assisted High Calcium Fly Ash Geopolymer,” *Materials and Structures* 46 (3), 375–381, 2013.

Clarke, J., L., Structural lightweight aggregate concrete, *Chapman and Hall*, Great Britain, 1993.

Colaco, J. P., “One shell plaza, houston”, *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 9(2), 79-82, 2004.

Collins, F. and Sanjayan, J.G., “Strength and shrinkage properties of alkali-activated slag concrete containing porous coarse aggregate”, *Cement and Concrete Research* 29, 607–610, 1999.

Criado, M., Fernández-Jiménez, A., de la Torre, A.G., Aranda, M.A.G. and Palomo A., “An XRD study of the effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio on the alkali activation of fly ash”, *Cement and Concrete Research* 37, 671–679, 2007.



Criado, M., Palomo, A. and Fern´andez-Jim´enez, A., “Alkali activation of fly ashes. Part 1. Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products”, *Fuel* 84, 2048–2054, 2005.

Çobanoğlu, D. ve Özpınar, Y., “Sandıklı (Afyon) tüflerinin mühendislik özellikleri ve beton agregası olarak kullanım olanaklarının incelenmesi”, *Geosound Yerbilimleri Dergisi* 42, 205-222, Adana, 2003.

Dali, C.J.L., Bondar, M. N. B. and Hassani, N., “Oxygen and chloride permeability of alkali-activated natural pozzolan concrete”, *ACI Materials Journal* 109 (1), 53–61, 2012.

Damtoft, J.S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D. and Gartner, E., “Sustainable development and climate change initiatives”, *Cement and Concrete Research* 38 (2), 115–127, 2008.

Das, S., Yang, P., Singh, S. S., Mertens, J. C., Xiao, X., Chawla, N., and Neithalath, N., “Effective properties of a fly ash geopolymer: Synergistic application of X-ray synchrotron tomography, nanoindentation, and homogenization models”, *Cement and Concrete Research* 78, 252-262, 2015.

Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and Applications, *Institut Géopolymère*, Saint-Quentin, 2008.

Deja, J., “Carbonation aspects of alkali activated slag mortars and concretes”, *Silicates Industriels* 7 (1), 37–42, 2002.

Della, W.J., Roy, M. and Silsbee M.R., “Chloride diffusion in ordinary, blended, and alkali-activated cement pastes and its relation to other properties”, *Cement and Concrete Research* 30, 1879–1884, 2000.

Demir, D., Afyon bölgesi tüflerinin tuğla üretiminde kullanılması, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2001.

Devecioğlu, A. G. ve Biçer, Y., “Genleştirilmiş kil agregalı betonların ısı özelliklerinin incelenmesi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, Cilt 3, Sayı 2, s.75 – 81, 2012.

Devecioğlu, A. G., Kitre katkılı genleştirilmiş kil agregalı betonların ısıl ve mekanik özelliklerinin analizi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 2012.

Dikici, T., Taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2010.

Dilli, M. E., Hafif agrega içeren yalın ve pva lif ile gclendirilmiş yapısal betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2015.

Doğan, H. ve şener, F., “Hafif Yapı Malzemeleri Kullanımının Yaygınlaştırılmasına Yönelik Sonuç ve neriler”, *MTA Haber Bülteni*, Ankara, 2004.

Dolđun, O., Kendiliğinden yerleşen betonlarda ğtlmş pomza kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Niğe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğe, s.20-24, 2010.

Domagała, L., “Modification of properties of structural lightweight concrete with steel fibres”, *Journal of Civil Engineering Management* 17(1), 36–44, 2011.

Doruk, M., “Volkanik tüflerin karayolu yapımında kullanılması ile ilgili bir alışma”, *Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Fen Heyeti Müdürlüğü*, Ankara, 1974.

Douglas, E., Bilodeau, A. and Malhotra, V.M., “Properties and durability of alkaliactivated slag concrete”, *ACI Materials Journal* 89, 1992.

DPT: 2617 - İK: 628, Yapı malzemeleri III (pomza-perlit-vermikülit- flogopit-genlesen killer) alışma grubu raporu, *Madencilik zel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu*, Ankara,2001.

Duran, S., Beton katkı maddelerinin karapınar volkanik agregasından imal edilen hafif betonun bazı özelliklerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2003.

Duxson, P., Fernndez-Jimnez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A. and van Deventer, J.S.J., “Geopolymer technology: the current state of the art” *Journal of Materials Science* 42(9), 2917–2933, 2007.

- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Separovic, F. and van Deventer, J.S.J., “ $^{29}\text{Si}$  NMR study of structural ordering in aluminosilicate geopolymer gels”, *Langmuir* 21 (7), 3028–3036, 2005.
- Džunuzović, N., Komljenović, M., Nikolić, V. and Ivanović, T., “External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite”, *Construction and Building Materials* 157, 737-747, 2017.
- Erdoğan, T.Y., Beton, *ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.*, Ankara, 2003.
- Ergül, A., Afyonkarahisar’da yapıtaşı olarak kullanılan tüflerdeki poroziteye bağlı su içeriğinin fizikomekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 2009.
- Ergun, A., “Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete”, *Construction and Building Materials* 25, 806–812, 2011.
- Escalante-García, J. I., Palacios-Villanueva, V. M., Gorokhovskiy, A. V., Mendoza-Suárez, G. and Fuentes, A. F., “Characteristics of a NaOH-activated blast furnace slag blended with a fine particle silica waste”, *Journal of the American Ceramic Society* 7(85), 1788–1792, 2002.
- Escalante-Garcia, J., Fuentes, A.F., Gorokhovskiy, A., Fraire-Luna, P.E. and Mendoza-Suarez, G., “Hydration products and reactivity of blast-furnace slag activated by various alkalis”, *Journal of the American Ceramic Society* 86 (12), 2148–2153, 2003.
- ESCSI, Lightweight concrete (History, Application, Economics), *ESCSI*, Washington D.C., 1960.
- Evans, A.M., Ore geology and industrial minerals : An Introduction. 3rd ed., *Blackwell Scientific Publications*, London, s. 390, 1993.
- Fang, G., Bahrami, H. and Zhang, M., “Mechanisms of autogenous shrinkage of alkali-activated fly ash-slag pastes cured at ambient temperature within 24 h”, *Construction and Building Materials* 171, 377-387, 2018.

- Fernández-Jiménez, A. and Puertas, F., “Alkali-activated slag cements: kinetic studies”, *Cement and Concrete Research* 27 (3), 359–368, 1997.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F. and Arteaga, A., “Determination of kinetic equations of alkaline activation of blast furnace slag by means of calorimetric data”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 52 (3), 945–955, 1998.
- Fernández-Jiménez, A., Puertas, F., Sobrados, I. and Sanz, J., “Structure of calcium silicate hydrates formed in alkaline-activated slag: influence of the type of alkaline activator”, *Journal of the American Ceramic Society* 86 (8), 1389–1394, 2003.
- Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., “Mid-infrared spectroscopic studies of alkali-activated fly ash structure”, *Microporous Mesoporous Materials* 86, 207–214, 2005.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. and Criado, M., “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model”, *Cement and Concrete Research* 35 (6), 1204–1209, 2005.
- Fernández-Jiménez, A., García-Lodeiro, I. and Palomo, A., “Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials”, *Journal of Materials Science* 42 (9), 3055–3065, 2006.
- Ferrer, B., Bogas, J. A. and Real, S., “Service life of structural lightweight aggregate concrete under carbonation-induced corrosion” *Construction and Building Materials* 120, 161–171, 2016.
- FIP, Manual of lightweight aggregate concrete, 2nd Edition, *Surrey University Press*, 1983.
- Gao, X., Yu, Q.L. and Brouwers, H.J.H., “Assessing the porosity and shrinkage of alkali-activated slag-fly ash composites designed applying a packing model”, *Construction and Building Materials* 119, 175–184, 2016.
- Gartner, E., “Industrially interesting approaches to “low-CO<sub>2</sub>” cements”, *Cement and Concrete Research* 34, 1489–1498, 2004.
- Gifford, P.M. and Gillott, J.E., “Alkali-silica reaction (ASR) and alkali-carbonate reaction (ACR) in activated blast furnace slag cement (ABFSC) concrete”, *Cement and Concrete Research* 26, 21–26, 1996.

Glukhovsky, V.D., Ancient, modern and future concretes: in proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, *VIPOL Stock Company*, Vol. 1, pp. 1–9, Kiev, Ukraine, 1994.

Guerrieri, M. and Sanajayan, J. G., “Behavior of combined fly ash/slag-based geopolymers when exposed to high temperatures”, *Fire and Materials* 34(4), 163–175, 2009.

Gül, R. ve Geçten, O., “Hafif agregalı betonun kullanılabilirliği”, *DSİ Teknik Bülteni* 81, s. 31-36, Ankara, 1994.

Gündüz, L., Pomza teknolojisi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, Isparta, 1998.

Gündüz, L., Sarıışık, A., Davraz, M., Uğur, İ. ve Çankıran, O., Pomza teknolojisi 1, *Süleyman Demirel Üniversitesi Yayını*, Isparta, 1998.

Gündüz, L., Şapcı, N., Bekar, M., and Yorgun, S., Genleşmiş kilin hafif agrega olarak kullanılabilirliği, *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi* 1(2), 43-49, 2006.

Haha, B. M., Le Saout, G., Winnefeld, F. and Lothenbach, B., “Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags”, *Cement and Concrete Research* 41 (3), 301–310, 2011.

Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., and Rangan, B. V., “On the development of fly ash-based geopolymer concrete”, *Materials Journal* 101 (6), 467–472, 2004.

Hardjito, D., Studies of Fly Ash-based Geopolymer Concrete, Doctoral Dissertation, *Curtin University*, 2005.

Hassanpour, M., Shafigh, P. and Mahmud, H. B., “Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review”, *Construction and Building Materials* 37, 452–461, 2012.

Heikal, M., Nassar, M.Y., El-Sayed, G. and Ibrahim, S.M., “Physico-chemical, mechanical, microstructure and durability characteristics of alkali activated Egyptian slag”, *Construction and Building Materials* 69, 60–72, 2014.

Hengst, R. and Tressler, R., “Fracture of foamed Portland cements”, *Cement and Concrete Research* 13 (1), 127–134, 1983

Hewlett, P.C., Lea's Chemistry of Cement and Concrete, *Elsevier Ltd.*, 4th ed, Oxford, United Kingdom, 1998.

Holm, T.A., "Three decades of durability", *Military Engineering* 75 (498), 413–416, 1983.

Holm, T.A., Bremner, T. and Vaysburd, A., "Carbonation of marine structural lightweight concrete", *Second International Conference on Performance of Concrete in Marine Environment*, s.667–676, St. Andrews, Canada, 1988.

Huang, G., Ji, Y., Li, J., Zhang, L., Liu, X. and Liu, B., "Effect of activated silica on polymerization mechanism and strength development of MSWI bottom ash alkali-activated mortars", *Construction and Building Materials* 201, 90-99, 2019.

Huiskes, D.M.A., Keulena, A., Yua, Q.L., and Brouwers, H.J.H., "Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete", *Materials and Design* 89, 516–526, 2016.

Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S. and van Deventer, J. S. J., "Microstructural Changes in Alkali Activated Fly Ash/Slag Geopolymers with Sulfate Exposure," *Materials and Structures* 46 (3), 361–373, 2013a.

Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S. and van Deventer, J. S. J., "Drying-Induced Changes in the Structure of Alkali-Activated Pastes," *Journal of Materials Science* 48(9), 3566–3577, 2013b.

Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Brice, D. G., Kilcullen, A. R., Hamdan, S. and van Deventer, J. S. J., "Influence of Fly Ash on the Water and Chloride Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars and Concretes," *Construction and Building Materials* 48, 1187–1201, 2013c.

Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Hamdan, S. and van Deventer, J.S.J., "Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash", *Cement and Concrete Composites* 45, 125–135, 2014.

Jo, B., Park, S. and Park, J., "Properties of concrete made with alkali-activated fly ash lightweight aggregate (AFLA)", *Cement and Concrete Composites* 29, 128–135, 2007.

Juenger, M.C.G., Winnefeld, F., Provis, J.L. and Ideker, J., “Advances in alternative cementitious binders”, *Cement and Concrete Research* 41 (12), 1232–1243, 2011.

Kabay, N., Hafif agregalı betonun boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2009.

Kar, A., Halabe, U. B., Ray, I. and Unnikrishnan, A., “Nondestructive characterizations of alkali activated fly ash and/or slag concrete”, *European Scientific Journal*, 9(24), 2013.

Kayalı, O., Haque, M.N. and Zhu, B., “Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash”, *Cement and Concrete Research* 29, 1835–1840, 1999.

Kayalı, O., “Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete”, *Construction and Building Materials* 22, 2393–2399, 2008.

Kayali, O., Khan, M. S. H. and Sharfuddin Ahmed, M., “The Role of Hydrotalcite in Chloride Binding and Corrosion Protection in Concretes with Ground Granulated Blast Furnace Slag,” *Cement and Concrete Composites* 34(8), 936–945, 2012.

Kılıç, A., Atış, C. D., Yaşar, E. and Özcan, F., “High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures”, *Cement and Concrete Research* 33, 1595–1599, 2003.

Koçkal, N.U., Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the performance of lightweight concretes, Doktora Tezi, *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2008.

Komljenović, M., Baščarević, Z. and Bradić, V., “Mechanical and Microstructural Properties of Alkali Activated Fly Ash Geopolymers”, *Journal of Hazardous Materials*, 181,35-42, 2010.

Komljenović, M., Baščarević, Z., Marjanović, N. and Nikolić, V., “External sulfate attack on alkali-activated slag”, *Construction and Building Materials* 49, 31-39, 2013.

Kostick, D.S., “Mineral Commodity Summaries – Soda Ash”, *U.S. Geological Survey*, 2011a.

- Kostick, D.S., “Mineral Commodity Summaries – Sodium Sulfate”, *U.S. Geological Survey*, 2011b.
- Krivenko, P.V., Gelevera, A. and Fedorenko, V., “The effect of alkali on destructive and constructive processes during alkali aggregate reaction”, *First International Conference on Advances in Chemically-Activated Materials*, Jinan, China, s. 140–147, 2010.
- Kucharczyková, B., Keršner, Z., Pospíchal, O., Misák, P. and Vymazal, T., “Influence of freeze–thaw cycles on fracture parameters values of lightweight concrete”, *Procedia Engineering* 2, 959–966, 2010.
- Kumar, S., Kumar, R. and Mehrotra, S.P., “Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer”, *Journal of Materials Science* 45, 607–615, 2010.
- Kurt, C. and Bittner, J., Sodium hydroxide In: Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry, *Wiley-VCH Verlag*, Weinheim , 2006.
- Lamond, J. F. and Pielert, J., Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, *ASTM Publication*, 2006.
- Law, D.W., Adam, A.A., Molyneaux, T.K. and Patnaikuni I., “Durability assessment of alkali activated slag (AAS) concrete”, *Materials and Structures* 45 (9), 1425–1437, 2012.
- Lee, N. K., Jang, J. G. and Lee, H. K., “Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages”, *Cement and Concrete Composites* 53, 239-248, 2014.
- Lee, N.K. and Lee, H.K., “Influence of the slag content on the chloride and sulfuric acid resistances of alkali-activated fly ash/slag paste”, *Cement and Concrete Composites* 72, 168- 179, 2016.
- Lee, N. K., Koh, K. T., An, G. H. and Ryu, G. S., “Influence of binder composition on the gel structure in alkali activated fly ash/slag pastes exposed to elevated temperatures”, *Ceramics International* 43(2), 2471-2480, 2017.



- Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G. and Lu, P., “Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites”, *Composites Part B: Engineering* 164, 747–757, 2019.
- Lloyd, R.R., Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J., “Acid resistance of inorganic polymer binders. 1. Corrosion rate”, *Materials and Structures* 45, 1–14, 2012.
- Lloyd, R.R., Provis, J.L., Smeaton, K.J. and van Deventer, J.S.J., “Spatial distribution of pores in fly ash-based inorganic polymer gels visualised by Wood's metal intrusion”, *Microporous and Mesoporous Materials* 126, 32–39, 2009.
- Lu, D., Liu, Y. and Xu, Z., “ASR behavior of various glass aggregates in geopolymermortars”, *Second International Conference on Advances in Chemically-Activated Materials (CAM'2014)*, s. 376–384, Changsha, China, 2014.
- Luna-Galiano, Y., Fernández-Pereira, C. and Izquierdo, M., “Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength”, *Materiales de construcción* 66 (324), 2016.
- Ma, Y., Hu, J. and Ye, G., “The pore structure and permeability of alkali activated fly ash”, *Fuel* 104, 771–780, 2013.
- Marjanović, N., Komljenović, M., Bašćarević, Z., Nikolić, V. and Petrović, R., “Physical–mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash–blast furnace slag blends”, *Ceramics International* 41(1), 1421-1435, 2015.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M., Concrete microstructure, properties, and materials, third edition, *McGraw-Hill*, USA, 2006.
- Mircea, D., Loani, A., Filip, M. and Pepenar, I., “Long-term durability of reinforced and prestressed elements in aggressive environments”, *ACI Materials Journal* 91 (2), 135–140, 1994.
- Mithun, B.M. and Narasimhan, M.C., “Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate”, *Journal of Cleaner Production* 112, 837–844, 2016.
- Mo, K. H., Alengaram, U. J. and Jumaat, M. Z., “Bond properties of lightweight concrete – A review”, *Construction and Building Materials* 112, 478–496, 2016.

- Mobili, A., Belli, A., Giosuè C., Bellezze, T., Tittarelli, F., “Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class”, *Cement and Concrete Research* 88, 198–210, 2016.
- Monnin, C. and Dubois, M., “Thermodynamics of the LiOH+H<sub>2</sub>O system”, *Journal of Chemical and Engineering Data* 50 (4), 1109–1113, 2005.
- Myers, R.J., Bernal, S.A., San Nicolas, R. and Provis, J.L., “Generalized structural description of calciumsodium aluminosilicate hydrate gels: the crosslinked substituted tobermorite model”, *Langmuir* 29(5), 294–306, 2013.
- Najafi Kani, E., Allahverdi, A. and Provis J.L., “Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan”, *Cement and Concrete Composites* 34, 25–33, 2012.
- Nasr, D., Pakshir, A. H., and Ghayour, H., “The influence of curing conditions and alkaline activator concentration on elevated temperature behavior of alkali activated slag (AAS) mortars”, *Construction and Building Materials* 190, 108-119, 2018.
- Nematollahi, B., Ranade, R., Sanjayan, J. and Ramakrishnan, S., “Thermal and mechanical properties of sustainable lightweight strain hardening geopolymer composites”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 17, 55 – 64, 2017.
- Neville, A.M. and Brooks, J.J., Concrete technology, *Pearson Education Asia Pte Ltd.*, Malaysia, 2008.
- Neville, A.M., Properties of concrete, *Longman Scientific and Technical*, Third Edition, New York, 2000.
- Newman, J., Advanced concrete technology processes, *Elsevier Ltd.*, London, 2003.
- Newman, J.B., Properties of structural lightweight aggregate concrete, in: J.L. Clarke (Ed.), Structural Lightweight Aggregate Concrete, *Chapman and Hall*, Glasgow, UK, , pp. 19–44, 1993.
- Oderji, S. Y., Chen, B., Ahmad, M. R. and Shah, S. F. A., “Fresh and hardened properties of one-part fly ash-based geopolymer binders cured at room temperature: Effect of slag and alkali activators”, *Journal of Cleaner Production* 255, 1-10, 2019.

- Oh, J.E., Monteiro, P.J.M., Jun, S.S., Choi, S. and Clark, S.M., “The evolution of strength and crystalline phases for alkali-activated ground blast furnace slag and fly ash-based geopolymers”, *Cement and Concrete Research* 40, 189–196, 2010.
- Ohuchi, T., Hara, M., Kubota, N., Kobayoshi, A., Nishioka, S. and Yokoyama, M. “Some long-term observation results of artificial lightweight aggregate concrete for structural use in Japan”, *Proceedings of International Symposium on Long-term Observation of Concrete Structures 2*, 274–282, Budapest, Hungary, 1984.
- Okada, K., Ooyama, A., Isobe, T., Kameshima, Y., Nakajima, A. and MacKenzie K.J.D., “Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications”, *Journal of the European Ceramic Society* 29 (10), 1917–1923, 2009.
- Olivia, M. and Nikraz, H.R., “Strength and water penetrability of fly ash geopolymer concrete”, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences* 6, 70–78, 2011.
- Özodabaş, A. and Yılmaz, K., “Improvement of the performance of alkali activated blast furnace slag mortars with very finely ground pumice”, *Construction and Building Materials* 48, 26–34, 2013.
- Palacios, M. and Puertas, F., “Effect of Carbonation on Alkali-Activated Slag Paste,” *Journal of the American Ceramic Society* 89 (10), 3211–3221, 2006.
- Palomo, A., Grutzeckb, M.W. and Blanco, M.T., “Alkali-activated fly ashes A cement for the future”, *Cement and Concrete Research* 29, 1323–1329, 1999.
- Palomo, A., Alonso, S., Fern´andez-Jim´enez, A., Sobrados, I. and Sanz, J., “Alkaline activation of fly ashes: NMR study of the reaction products”, *Journal of the American Ceramic Society* 87, 1141–1145, 2004.
- Pan, Z., Tao, Z., Cao, Y.F., Wuhner, R. and T. Murphy, “Compressive strength and microstructure of alkali-activated fly ash/slag binders at high temperature”, *Cement and Concrete Composites* 86, 9–18, 2018.
- Park, S. M., Jang, J. G., Lee, N. K., and Lee, H. K., “Physicochemical properties of binder gel in alkali-activated fly ash/slag exposed to high temperatures”, *Cement and Concrete Research* 89, 72-79, 2016.

- Pasupathy, K., Berndt, M., Castel, A., Sanjayan, J., Pathmanathan, R., “Carbonation of a blended slag-fly ash geopolymer concrete in field conditions after 8 years”, *Construction and Building Materials* 125, 661–669, 2016.
- Provis, J.L., Activating solution chemistry for geopolymers, in: Provis, J.L., van Deventer, J.S.J. (eds.) *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*, **Woodhead Publishing**, pp. 50–71. Cambridge, 2009.
- Provis, J.L., Yong, C.Z., Duxson, P. and van Deventer, J.S.J., “Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate–fly ash geopolymers”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 336, 57–63, 2009a.
- Provis, J.L., Yong, S.L. and Duxson, P., Nanostructure/microstructure of metakaolin geopolymers in: *Geopolymers*, **Woodhead Publishing**, 72–88, 2009b.
- Provis, J.L., Myers, R.J., White, C.E., Rose, V. and van Deventer, J.S.J., “X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders”, *Cement and Concrete Research* 42 (6), 855–864, 2012.
- Provis, J.L. and Bernal, S.A., “Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials”, *The Annual Review of Materials Research* 44(3), 299-327, 2014.
- Provis, J. L., Bilek, V., Buchwald, A., Dombrowski-Daube, K., and Varela, B., Durability and Testing - Physical Processes, pp. 277–307 in *Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art Report*, Rilem TC 224-AAM, Edited by J. L. Provis and J. S. J. van Deventer. **Springer/RILEM**, Dordrecht, The Netherlands. 2014.
- Provis, J.L. and van Deventer, J., Alkali Activated Materials, *RILEM State-of-the-Art Reports*, 2014.
- Provis, J. L., Palomo, A. and Shi C., “Advances in understanding alkali-activated materials”, *Cement and Concrete Research* 78, 110–125, 2015.
- Puertas, F., “Cementos de escoria activados alcalinamente: situación actual y perspectivas de futuro”, *Materiales de Construcción* 45 (239), 53–64, 1995.
- Puertas, F., Gutiérrez, R.D., Fernández-Jiménez, A., Delvasto, S. and Maldonado, J., “Alkaline cement mortars. Chemical resistance to sulfate and seawater attack”, *Materiales de Construcción* 52 (267), 55–71, 2002.

- Puertas, F., Palacios, M. and Vázquez, T., “Carbonation process of alkali-activated slag mortars”, *Journal of Materials Science* 41 (10), 3071–3082, 2005.
- Puertas, F., Palacios, M., Manzano, H., Dolado, J.S., Rico, A. and Rodríguez, J., “A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements”, *Journal of the European Ceramic Society* 31, 2043–2056, 2011.
- Rahier, H., Simons, W., Van Mele, B., Biesemans, M., “Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses”, *Journal of Materials Science* 32 (9), 2237–2247, 1997.
- Rashad, A. M, Zeedan, S. R, Hassan, H.A. “A preliminary study of autoclaved alkali-activated slag blended with quartz powder”, *Construction and Building Materials* 33, 70–79, 2012.
- Rashad, A.M., “A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for Civil Engineer”, *Construction and Building Materials* 47, 29–55, 2013.
- Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P., “Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer”, *Minerals Engineering* 22, 1073–1078, 2009.
- Real, S. and Bogas, J.A., “Oxygen permeability of structural lightweight aggregate concrete”, *Construction and Building Materials* 137, 21–34, 2017.
- Rees, C.A., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J., “Attenuated total reflectance Fourier transform infrared analysis of fly ash geopolymer gel aging”. *Langmuir* 23, 8170–8179, 2007a.
- Rees, C.A., Provis, J.L., Lukey, G.C. and van Deventer, J.S.J., “In situ ATR-FTIR study of the early stages of fly ash geopolymer gel formation”, *Langmuir* 23, 9076–9082, 2007b.
- RILEM, Functional classification of lightweight concretes: Recommendation LC2, Second Edition, *RILEM*, 1978.
- Rodríguez, E., Bernal, S., Mejía de Gutiérrez, R. and Puertas F., “Alternative concrete based on alkali-activated slag”, *Materiales de Construcción* 58 (291), 53–67, 2008.
- Rostami, M. and Behfarnia, K., “The effect of silica fume on durability of alkali activated slag concrete”, *Construction and Building Materials* 134, 262–268, 2017.

- Roy, D. M., “Alkali-activated cements Opportunities and challenges”, *Cement and Concrete Research* 29, 249–254, 1999.
- Sakulich, A. R. and Bentz, D. P., “Mitigation of Autogenous Shrinkage in Alkali Activated Slag Mortars by Internal Curing,” *Materials and Structures* 46 (8), 1355–1367, 2013.
- Sandor, P., Concrete Materials Second Edition, *Noyes Publications*, Newjersey, USA, 1992.
- Seyhan, İ., Genleşen killer, Sekizinci beş yıllık kalkınma planı, Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu endüstriyel hammaddeler alt komisyonu yapı malzemeleri III, *Devlet Planlama Teşkilatı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu*, DPT: 2617 - ÖİK: 628 Ankara, 2001.
- Shah, P. and Ahmad, S.H., High performance concretes and applications, *CRC Press*, London, 1994.
- Shaikh, F.U.A., “Effects of alkali solutions on corrosion durability of geopolymer concrete”, *Advances in Concrete Construction* 2 (2), 109–123, 2014.
- Shi, C., “Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars”, *Cement and Concrete Research* 26, 1789–1799, 1996.
- Shi, C. and Day, R.L., “Early strength development and hydration of alkali-activated blast furnace slag/fly ash blends”, *Advances in Cement Research* 11(4), 189–196, 1999.
- Shi, C. and Stegemann, J.A., “Acid corrosion resistance of different cementing materials”, *Cement and Concrete Research* 30, 803–808, 2000.
- Shi, C., Krivenko, P.V. and Roy, D.M., Alkali-Activated Cements and Concretes, *Taylor and Francis*, Abingdon, 2006.
- Shi, C., Shi, Z., Hu, X., Zhao, R. and Chong, L., “A review on alkali-aggregate reactions in alkali-activated mortars/ concretes made with alkali-reactive aggregates”, *Materials and Structures* 48, 621-628, 2015.
- Slaty, F., Khoury, H., Rahier, H. and Wastiels, J., “Durability of alkali activated cement produced from kaolinitic clay”, *Applied Clay Science* 104, 229–237, 2015.

Soutsos, M., Boyle, A. P., Vinai, R., Hadjierakleous, A. and Barnett, S. J., “Factors influencing the compressive strength of fly ash based geopolymers”, *Construction and Building Materials* 110, 355-368, 2016.

Swanton, S. W., Heath, T. G. and Clacher, A., “Leaching behaviour of low Ca: Si ratio CaO–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O systems”, *Cement and Concrete Research* 88, 82-95, 2016.

Şengün, N., Pomzanın hafif harç yapımında endüstriyel hammadde olarak kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, s.9-14, 2004.

Taylor, R., Richardson, I.G. and Brydson, R.M.D., “Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag”, *Cement and Concrete Research* 40, 971–983, 2010.

Tepfers, R. and Kutti, T., “Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete”, *Journal of ACI Proceedings* 76 (5), 635–652, 1979.

Terzić, A., Pezo, L., Mitić, V. and Radojević, Z., “Artificial fly ash based aggregates influence on lightweight concrete performances”, *Ceramics International* 41, 2714–2726, 2015.

Thokchom, S., Ghosh, P. and Ghosh, S., “Performance of Fly Ash Based Geopolymer Mortars in Sulphate Solution,” *Journal of Engineering Science and Technology Review* 3(1), 36–40, 2010.

Thomas, R. J. and Peethamparan, S., “Alkali-activated concrete: Engineering properties and stress–strain behavior”, *Construction and Building Materials* 93, 49–56, 2015.

Thunuguntla, C. S. and Rao, T.D.G., “Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete”, *Construction and Building Materials* 193, 173-188, 2018.

Toksoy, F., “Vermikülit: mineraloji, jeolojik oluşum, endüstriyel kullanım ve türkiye'deki durumu”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 1997.

Toktay, M. ve Erdoğan, K., Cüruflar ve cürüflü çimentolar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, 2002.

Topçu, İ.B., Hafif beton özelliklerinin kompozit malzeme olarak incelenmesi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1988.

Topçu, İ.B. and Uygunoğlu, T., “Properties of autoclaved lightweight aggregate concrete”, *Building and Environment* 42(12), 4108-4116, 2007.

Topçu, İ.B. and Işıkdag, B., “Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete”, *Journal Of Materials Processing Technology* 204, 34–38, 2008.

TS EN 13055, Hafif agregalar, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2016.

TS 2511, Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2017.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2016.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2013.

TS EN 12350-2, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12350-6, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 6: Yoğunluk, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-3, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-5, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-6, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.

TS EN 12390-7, Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2010.



TS EN 1363-1, Yangına dayanıklılık deneyleri- Bölüm 1: Genel kurallar, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2013.

TS EN 196-1, Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2016.

TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: genel çimentolar - bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2012.

TS EN 206:2013+A1, Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2017.

Türker, H. T., Balçıkanlı, M., Durmuş, İ. H., Özbay, E. and Erdemir, M., “Microstructural alteration of alkali activated slag mortars depend on exposed high temperature level”, **Construction and Building Materials** 104, 169-180, 2016.

Uyan, M., Beton ve harçlarda kılcallık olayı, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi**, İstanbul, 1975.

Uygunoğlu, T., Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri, Doktora Tezi, **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 2008.

Vafaei, M., Allahverdi, A., Dong, P. and Bassim, N., “Acid attack on geopolymer cement mortar based on waste-glass powder and calcium aluminate cement at mild concentration”, **Construction and Building Materials** 193, 363-372, 2018.

Vakhshouri, B. and Nejadi, S., “Mix design of light-weight self-compacting concrete”, **Case Studies in Construction Materials** 4, 1–14, 2016.

Valencia Saavedra, W.G., Angulo, D.E., Mejía de Gutiérrez, R., “Fly ash slag geopolymer concrete: resistance to sodium and magnesium sulfate attack”, **Journal of Materials in Civil Engineering** 28 (12), 2016.

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

van Deventer, J. S. J., Provis, J. L. and Duxson, P., “Technical and Commercial Progress in the Adoption of Geopolymer Cement,” **Minerals Engineering** 29, 89–104, 2012.

Vargas, A.S.D., Molin, D.C.C.D., Vilela, A.C.F., Silva, F.J., Pavao, B. and Veit, H., “The Effects Of Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> Molar Ratio, Curing Temperature and Age on Compressive Strength, Morphology and Microstructure of Alkali-Activated Fly Ash-Based Geopolymers”, *Cement Concrete Composites* 33, 653-660, 2011.

Wagh, A.S., Chemically Bonded Phosphate Ceramics, *Elsevier*, Oxford, 2004.

Wang, S. and Li, V.C., Lightweight engineered cementitious composites (ECC), in: Proceedings of 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4), vol. 1, *RILEM Publications S.A.R.L.*, 379–390, France, 2003.

Wang, S.D., Scrivener, K.L. and Pratt, P.L., “Factors affecting the strength of alkali-activated slag”, *Cement and Concrete Research* 24 (6), 1033–1043, 1994.

Wang, S.D., Pu, X.C., Scrivener, K.L. and Pratt, P.L., “Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems”, *Advances in Cement Research* 7 (27), 93–102, 1995.

Wang, W.C., Wang, H.Y. and Lo, M.H., “The fresh and engineering properties of alkali activated slag as a function of fly ash replacement and alkali concentration”, *Construction and Building Materials* 84, 224–229, 2015.

Weiguo, S., Wang, Y., Zhang, T., Zhou, M., Li, J. and Cui, X., “Magnesia modification of alkali-activated slag fly ash cement”, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 26(1), 121–125, 2011.

Wongpa, J., Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C. and Chindapasirt, P., “Compressive strength, modulus of elasticity, and water permeability of inorganic polymer concrete”, *Materials and Design* 31 (10), 4748–4754, 2010.

Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C. and Fang, C., “Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate”, *Composites Part B: Engineering* 164, 179-190, 2019.

Yang, C., Pu, X. and Wu, F., “Research on alkali aggregate reaction expansion of alkali-slag mortar”, *The Journal of the Chinese Ceramic Society* 27, 651–657, 1999.

Yazdi, M.A., Liebscher, M., Hempel, S., Yang, J. and Mechtcherine, V., “Correlation of microstructural and mechanical properties of geopolymers produced from fly ash and slag at room temperature”, *Construction and Building Materials* 191, 330–341, 2018.

Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E. ve Gönen, T., “Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi”, *Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları (Daum) Dergisi* 1, 118-123, 2003.

Ye, H. and Radlińska, A., “Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag”, *Cement and Concrete Research* 88, 126–135, 2016.

Yıldırım, A. N., Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, s.7-10, Konya, 2007.

Yuan, Q., Shi, C., De Schutter, G., Audenaert, K. and Deng, D., “Chloride Binding of Cement-Based Materials Subjected to External Chloride Environment – A Review,” *Construction and Building Materials* 23 (1), 1–13, 2009.

Zhang, M.H. and Gjvovrv, O.E., “Mechanical properties of high-strength lightweight concrete”, *ACI Materials Journal* 88 (3), 240–247, 1991.

Zhang, H.Y., Kodur, V., Wu, B., Cao, L. and Qi, S.L., “Comparative thermal and mechanical performance of geopolymers derived from metakaolin and fly ash”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 28 (2), 1-10, 2016.

Zhang, J., Shi, C., Zhang, Z. and Ou, Z., “ Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies”, *Construction and Building Materials* 152, 598–613, 2017.

## ÖZGEÇMİŞ

Serhat ÇELİKTEN 10.08.1988 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Niğde’de tamamladı. 2006 yılında başladığı Gaziantep Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında mezun oldu. 2014 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’ndaki Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 2011-2012 yılları arasında Ankara Su ve Kanalizasyon İdaresi’nde, 2012-2014 yılları arasında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı’nda ve 2014-2017 yılları arasında T.C.D.D. 2.Bölge Müdürlüğü bünyesinde Mühendis olarak çalıştı. 2017 yılında başladığı Eskişehir Teknik Üniversitesi Ulaştırma Meslek Yüksekokulu’ndaki Öğretim Görevliliğine halen devam etmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

## TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından, 1 (bir) adet uluslararası makale ve 1 (bir) adet uluslararası bildiri üretilmiştir. Bu üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Çelikten, S., Sarıdemir, M. and Deneme, İ.Ö., “Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag + fly ash mortars exposed to high temperature”.

*Construction and Building Materials*, 217, 50–61, 2019.

Çelikten, S. and Sarıdemir, M., “An investigation on the production potential of geopolymer mortar with Tunçbilek fly ash”, *IV. Uluslararası Seramik, Cam, Emaye, Sır ve Boya Kongresi (SERES'18)*, Eskişehir, Turkey, s. 295-300, 2018.