



**ZEOLİT METAKAOLİN ve YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BİRLİKTE
KULLANIMININ GAZBETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

**DOKTORA TEZİ
Kadir GÜÇLÜER**

**Danışman
Prof. Dr. İsmail DEMİR**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

Bu tez çalışması 15. FENBİL. 21 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ZEOLİT METAKAOLİN ve YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN
BİRLİKTE KULLANIMININ GAZBETON ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kadir GÜÇLÜER

Danışman
Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Kadir GÜÇLÜER tarafından hazırlanan “ZEOLİT METAKAOLİN VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BİRLİKTE KULLANIMININ GAZBETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 18/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail DEMİR

Başkan : Prof. Dr. H. Yılmaz ARUNTAŞ
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Prof. Dr. İsmail DEMİR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Osman GÜNAYDIN
Adıyaman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

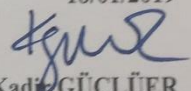
.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım
bu tez çalışmada;

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

beyan ederim.

18/01/2019

Kadri GÜÇLÜER

ÖZET

Doktora Tezi

ZEOLİT METAKAOLİN ve YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BİRLİKTE KULLANIMININ GAZBETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kadir GÜÇLÜER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Gazbeton, ince mineral maddeler ile birlikte bağlayıcı malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan harca gözenek oluşturuıcı katkı maddelerinin ilavesi ile elde edilen ve hafif beton sınıfında yer alan bir yapı malzemesidir. Bu tez çalışmasında, zeolit metakaolin ve yüksek fırın cürufu kullanılarak gazbeton örnekler üretilmiştir. Üretilen örnekler otoklav içerisinde yaklaşık 172 °C sıcaklık ve 8 bar buhar basıncı altında sertleştirilerek mekanik ve fiziksel deneylere tabi tutulmuşlardır. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için basınç dayanımı deneyi, fiziksel özelliklerin belirlenmesi için ise birim ağırlık, ultrases geçiş süresi deneyi uygulanmış ve ultrases geçiş süresi kullanılarak dinamik elastisite modülleri bulunmuştur. Ayrıca belirlenen örnekler üzerinde rötre, kapiler su emme ve donma çözünme deneyleri yürütülmüştür. Örneklerin mikroyapı çalışmaları SEM ve XRD tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelenerek belirlenen örnekler üzerinde ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Makroyapı çalışmasında örnekler SEM ile incelenmiş ve gözenek oluşumları imaj analizi yapılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, üretilen örneklerin fiziksel ve mekanik değerlerinde ticari gazbetonlar ile benzer değerlere ulaşılmış, ısı iletkenlik katsayılarında ise 0,12-0,13 W/mK değerleri elde edilmiştir.

2019, x + 114 sayfa

Anahtar Kelimeler: Gazbeton, Zeolit, Metakaolin, YFC, Mekanik ve Fiziksel Özellik,
Mikroyapı

ABSTRACT
Ph. D. Thesis

INVESTIGATION ON THE EFFECT OF COMBINED USE OF ZEOLITE
METAKAOLINE AND BLAST FURNACE SLAG IN AERATED CONCRETE
PROPERTIES

Kadir GÜÇLÜER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail DEMİR

Autoclaved aerated concrete is a lightweight concrete building material obtained by the addition of pore-forming additives to the mortar, which is formed by combining the binding materials with the fine mineral materials. In this thesis study, autoclaved aerated concrete samples have been produced with industrial raw materials such as zeolite and metakaolin, and waste materials such as blast furnace slag in artificial pozzolan class. The samples were subjected to mechanical and physical tests in an autoclave at a temperature of about 172 °C and a hardness of 8 bar under a steam pressure. For determination of mechanical properties, it was applied compressive strength test and physical properties were determined unit weight, ultrasound transition speed test and dynamic elasticity modules were found by using ultrasonic transition time. In addition, drying shrinkage, capillarity and freeze thaw measurements were performed on the specimens. Microstructure studies of the samples were carried out using SEM and XRD technique. The thermal conductivity coefficient measurements were made on the specimens determined from the test results. As a result of, similar values were obtained with commercial autoclaved aerated concrete physical and mechanical properties of the produced samples and 0,12-0,13 W/mK values were obtained in thermal conductivity coefficients.

2019, x + 114 pages

Keywords: Autoclaved aerated concrete, Zeolite, Metakaoline, BFS, Mechanical and Physical Properties, Microstructure

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR'e, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN'a ve Sayın Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR'a, her konuda yardımlarını gördüğüm Sayın Doç. Dr. Osman GÜNAYDIN'a, Antalya YTONG ve OYAK Çimento Adana tesislerine teşekkür ederim.

Bu çalışmayı 15. FENBİL. 21 nolu proje ile destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi BAPK birimine,

Tez çalışması süresince maddi ve manevi destekleri esirgemeyen eşim Sultan GÜÇLÜER'e ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Kadir GÜÇLÜER

AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Hafif Betonlar	3
2.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması	4
2.1.2 Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	5
2.1.3 Hafif Betonların Avantajları.....	5
2.1.4 Hafif Betonların Dezavantajları.....	5
2.2 Gazbeton	6
2.2.1 Gazbeton Üretimi	8
2.2.2 Gazbeton Özellikleri.....	11
2.2.2.1 Gazbetonun Fiziksel Özellikleri	11
2.2.2.2 Gazbetonun Kimyasal Özellikleri.....	11
2.2.2.3 Gazbetonun Mekanik Özellikleri.....	11
2.2.3 Gazbeton Ürünleri	12
2.2.3.1 Donatısız Gazbeton Ürünleri	12
2.2.3.2 Donatılı Gazbeton Ürünleri	12
2.2.4 Gazbetonun Sağladığı Yararlar	13
2.2.4.1 Gazbetonun Tasarımda Sağladığı Yararlar	13
2.2.4.2 Gazbetonun Yapımda sağladığı Yararlar.....	13
2.2.4.3 Gazbetonun Yapıda Sağladığı Yararlar	14
2.3 Zeolit.....	14
2.3.1 Zeolitlerin Oluşumu.....	16
2.3.2 Zeolit Rezervleri ve Kullanım Alanları	17
2.4 Metakaolin	20

2.5 Yüksek Fırın Cürufu	23
2.6 Gazbeton İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar.....	27
3. MATERYAL ve METOT	38
3.1 Materyal	38
3.2 Metot.....	42
3.2.1 Puzolanik Aktivite Deneyi	46
3.2.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi	46
3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi	47
3.2.4 Basınç Dayanımı Deneyi	47
3.2.5 Dinamik Elastisite Modülü Deneyi	47
3.2.6 Isı İletkenlik Deneyi	48
3.2.7 Rötire Deneyi.....	49
3.2.8 Akışkanlık Deneyi	50
3.2.9 Makroyapı Çalışmaları	52
3.2.10 Mikroyapı Çalışmaları.....	53
3.2.11 Donma Çözünme ve Kapiler Su Emme Deneyi	53
3.2.12 Su Buharı Difüzyonu Direnç Katsayısı Deneyi.....	54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	55
4.1 Puzolanik Aktivite Bulguları	55
4.2 Birim Hacim Ağırlık Bulguları.....	56
4.3 Ultrases Geçiş Hızı Bulguları	60
4.4 Basınç Dayanımı Bulguları.....	62
4.5 Dinamik Elastisite Modülü Bulguları	67
4.6 Mikroyapı Bulguları	71
4.7 Makroyapı Bulguları.....	80
4.8 Akışkanlık Bulguları.....	83
4.9 Rötire Bulguları	88
4.10 Isı İletkenlik Katsayısı Bulguları	89
4.11 Donma Çözünme ve Kapiler Su Emme Bulguları	91
4.12 Su Buharı Difüzyonu Direnç Katsayısı Bulguları	94
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	95
5.1 Sonuçlar	95
5.2 Öneriler	98
6. KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	113

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

bar	Bar (Basınç göstergesi)
Δ	Birim hacim ağırlık
Δl	Boy değişimi
Ed	Dinamik elastisite modülü
GPa	Gigapascal
g	Gram
kg	Kilogram
kgf	Kilogramkuvvet
kN	Kilo Newton
λ	Lambda
MPa	Megapascal
m^3	Metreküp
μm	Mikrometre
μs	Mikrosaniye
N	Newton
μs	Mikrosaniye
R	Rötre
cm^3	Santimetreküp

Kısaltmalar

BHA	Birim hacim ağırlık
LTBD	Lazer tane boyut dağılımı
M	Metakaolin
M*	Metakaolin ve akışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı elektron mikroskop
XRD	X-Işınları difraksiyonu
YFC	Yüksek fırın cürufu
YFC*	Yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı
Z	Zeolit
Z*	Zeolit ve akışkanlaştırıcı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Gazbeton üretim tekniği	8
Şekil 2.2 Zeolitin mikroyapısı	16
Şekil 2.3 Türkiye’deki zeolit yatakları	20
Şekil 2.4 Kaolin minerali	21
Şekil 2.5 Metakaolin mineralinin SEM görüntüleri	23
Şekil 2.6 Yüksek fırın şeması.....	25
Şekil 3.1 Hammaddelere ait lazer tane boyut dağılım grafiği	40
Şekil 3.2 Zeolite ait XRD analizi	41
Şekil 3.3 Metakaoline ait XRD analizi	41
Şekil 3.4 YFC’ye ait XRD analizi.....	42
Şekil 3.5 Gazbeton üretim şeması	43
Şekil 3.6 Akışkanlaştırıcı çalışma prensibi	51
Şekil 4.1 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait B.H.A. bulguları	56
Şekil 4.2 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilere ait B.H.A. bulguları	57
Şekil 4.3 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait B.H.A. bulguları.....	58
Şekil 4.4 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait B.H.A. bulguları	59
Şekil 4.5 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları. 60	
Şekil 4.6 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları	61
Şekil 4.7 Zeolit, MK, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları.....	61
Şekil 4.8 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları	62
Şekil 4.9 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları ...	63
Şekil 4.10 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları	64
Şekil 4.11 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları	65
Şekil 4.12 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları.....	66
Şekil 4.13 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları.....	67

Şekil 4.14 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları	68
Şekil 4.15 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları	69
Şekil 4.16 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları	69
Şekil 4.17 Zeolit ile üretilen örneğe ait XRD analizi	71
Şekil 4.18 Zeolit ile üretilen örneğe ait SEM-EDX analizi	72
Şekil 4.19 Zeolit ile üretilen örnekte tobermorit (a) ve etrengit (b) oluşumları	72
Şekil 4.20 Metakaolin ile üretilen örneğe ait XRD analizi	73
Şekil 4.21 Metakaolin ile üretilen örneğe ait SEM görüntüleri	73
Şekil 4.22 YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi	74
Şekil 4.23 YFC ile üretilen örneğe ait SEM-EDX analizi	74
Şekil 4.24 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örneğe ait XRD analizi	75
Şekil 4.25 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örnekte etrengit oluşumu	75
Şekil 4.26 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örnekte tobermorit oluşumları	76
Şekil 4.27 Metakaolin ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi	76
Şekil 4.28 Metakaolin ve YFC ile üretilen örnekte xonotlit oluşumu	77
Şekil 4.29 Metakaolin ve YFC ile üretilen örnekte tobermorit oluşumu	77
Şekil 4.30 Zeolit ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi	78
Şekil 4.31 Xonotlit fazına ait SEM-EDX görüntüsü	78
Şekil 4.32 Kristal C-S-H fazları ve CaO-SiO ₂ -H ₂ O sisteminde gösterimi	79
Şekil 4.33 Değişen sıcaklıklarda C-S-H fazlarının kararlılık sınırları	79
Şekil 4.34 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği	84
Şekil 4.35 Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği	85
Şekil 4.36 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği	86
Şekil 4.37 Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği	87
Şekil 4.38 Örneklere ait rötre verileri grafiği	89
Şekil 4.39 Kapiler su emme grafiği	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Hafif beton sınıfları	4
Çizelge 2.2 Gazbetonun B.H.A. ve basınç dayanımına göre sınıflandırılması	10
Çizelge 2.3 Doğal zeolitlerin oluşumu	17
Çizelge 3.1 Çimento ve minerallere ait kimyasal özellikler	38
Çizelge 3.2 Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	39
Çizelge 3.3 Kullanılan minerallere ait fiziksel özellikler	39
Çizelge 3.4 Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler	40
Çizelge 3.5 Karışım oranları	44
Çizelge 4.1 Puzolanlı harçların karışım oranları	55
Çizelge 4.2 Puzolanik aktivite indeksi bulguları	55
Çizelge 4.3 Zeolit ile üretilen örneklerle ait makroyapı bulguları	80
Çizelge 4.4 Metakaolin ile üretilen örneklerle ait makroyapı bulguları	81
Çizelge 4.5 YFC ile üretilen örneklerle ait makroyapı bulguları	82
Çizelge 4.6 Rötire ölçümü yapılan serilerin karışım oranları	88
Çizelge 4.7 Isı iletkenlik katsayısı ölçümü yapılan serilerin karışım oranları	90
Çizelge 4.8 Serilerin ısı iletkenlik katsayısı ölçüm değerleri	90
Çizelge 4.9 Serilerin ısı iletkenlik katsayılarının standart değerlerle karşılaştırılması ..	91
Çizelge 4.10 Donma çözünme bulguları	92
Çizelge 4.11 Kapiler su emme bulguları	93
Çizelge 4.12 Su buharı difüzyonu direnç katsayıları	94

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Kullanılan hammaddeler	38
Resim 3.2 Deney örneklerinin kür işlemi öncesi sertleştirilmesi.....	43
Resim 3.3 Deney örneklerinin otoklav içinde kür edilmesi.....	45
Resim 3.4 Deney örneklerinin ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi	45
Resim 3.5 Deney örneklerinin basınç dayanımlarının belirlenmesi	45
Resim 3.6 Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı ve deney örnekleri	48
Resim 3.7 Komparatör	50
Resim 3.8 Marsh hunisi ölçüm metodu	52
Resim 3.9 SEM cihazı.....	52
Resim 4.1 Zeolit ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi.....	80
Resim 4.2 Metakaolin ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi	81
Resim 4.3 YFC ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi	82
Resim 4.4 Rötire ölçüm çubukları ve komparatör	88

1. GİRİŞ

Malzeme bilimi konusu büyük ölçüde disiplinler arası bir konudur ve farklı çalışma alanlarının arakesitini oluşturmaktadır. Mühendislik, sanat ve mimarlık alanlarında, tasarım anındada ürünü oluşturan düşüncenin gerçekleşmesine yardımcı bulunan nesne malzemedir. Malzemenin tarihsel süreçteki reaksiyonu incelendiğinde, saf ve doğal malzemenin fonksiyonun zamanla birlikte azaldığı, buna karşı değişen teknolojiyle birlikte, farklı malzemelerin değişik tekniklerle biraraya getirildiği, kullanım amacına uygun özellikler barındıran, farklı bir ifadeyle kompozit malzemenin geliştiği ve çoğaldığı açıkça gözlenmektedir (Ersoy 2001).

19. asırdan sonra ekonomik ve sosyal değerlerin değişimi ile, malzeme teknolojisi oldukça değer kazanmış ve tüm tasarım aşamalarında, sadece bir malzeme ile değil malzeme bileşimlerinin oluşturduğu çözümler yer bulmaya başlamıştır (Eriç 2010).

Yapılar pek çok malzemenin fen ve teknik kurallarına göre biraraya getirilmesiyle inşa edilir. Yapıyı oluşturan malzemelerin her birinin tek tek niteliklerindeki yeterlik, tüm yapının yeterliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu husus o malzemenin veya yapının işlevselliğiyle ölçülebilir. İşlevsellikteki başarı, plan ve detay tasarımları yanında malzemenin özellikleri ile diğer malzemelerle olumsuz etkileşim içinde olup olmamasının bir bütün halinde değerlendirilmesi ile anlaşılır (Oymael 2016).

Günümüz dünyası enerji verimliliği ve hammadde korunumuyla birlikte üretimde bu kriterleri değiştirebilecek metodolojiler ve kaynak girdileri aramaktadır. İnşaat endüstrisine ülkemizde bakıldığında, gelişme ve iş imkanı yaratma oranları anlamında oldukça önemli bir yere sahiptir. Ülke bazında ve küresel anlamda üretimin devamlılığı, hem katma değer oluşturulması hem de dünya arenasında yer almayla birlikte önemli bir husus olarak değerlendirilmektedir.

Gelişen teknolojik imkanlarla birlikte, sektörel yönde de önemli değişiklikler gerçekleşmektedir. Özellikle yapı malzemeleri alanına bakıldığında, verimli enerji kullanımı, ekonomiklik, ekolojik verimliliğin geliştirilmesi maksadıyla olağan üretim

metotları ve kaynak kullanımına ikame teknik ve hammadde arayışı devam etmektedir.

Yapı malzemeleri alanında disiplinler arası çalışmanın getirdiği özverili çalışmalar sonucunda yapı malzemelerinin yalıtım özelliğinin geliştirilmesi devam etmektedir. Gazbeton gözenekli ve oldukça düşük yoğunluğa sahip hafif beton sınıfına dahil edilen ve yalıtım özelliği de oldukça kuvvetli olan yapı malzemesidir. Son dönemdeki gelişmelerde, donatılı şekilde de üretilerek özellikle endüstriyel tesislerin üretilmesinde, bunun yanında konut yapımında da tercih edilmektedir.

Duvar malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yüksek olması üretilen yapının ekonomik ve hizmet ömrünü doğrudan etkilemektedir. Gazbeton, diğer duvar malzemelerine göre daha fazla endüstriyel üretime sahip olduğundan aynı zamanda durabilite özelliği de oldukça iyidir.

Bu çalışmada, zeolit, metakaolin ve yüksek fırın cürufunun gazbeton üretiminde birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla geleneksel gazbeton üretiminde kullanılan öğütülmüş silis kumu yerine zeolit, metakaolin ve yüksek fırın cürufu hammaddeleri kullanılmıştır. Bu hammaddeler kullanılarak farklı karışım oranlarına sahip gazbeton deney örnekleri üretilmiştir. Deney örneklerine 172 °C'de 8 saat süreyle 8 bar buhar basıncı altında otoklav kürü uygulanmıştır. Örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik testler yürütülmüş, mikroyapıları ile gelişen faz yapıları SEM ve XRD teknikleri ile incelenmiştir. Farklı katkıları ve karışımlara sahip taze harçların akışkanlık özellikleri ölçülmüştür. Sertleşmiş gazbeton örnekler üzerinde rötre ve ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Sonuçta, gazbeton üretiminde silis kumu yerine mineral kökenli endüstriyel atık olan yüksek fırın cürufu ve zeolit, metakaolin gibi diğer hammaddelerin kullanılabileceği belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Hafif Betonlar

Farklı yöntemler kullanılarak beton içerisinde boşluk oluşturulmakta ve birim hacim ağırlığı azaltılabilmektedir. Bu yöntemlerle üretilen ve birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³'ten düşük olan betonlara hafif beton denilmektedir (Baradan vd. 2015). Hafif betonlar geçmişten günümüze kadar değişik tekniklerle üretilmektedir. Hafif betonlar; hafif agregalarla, kimyasal köpüklerle, ince agregada olmadan yalnız hafif iri agregada ile üretilirler. Bunların arasında en genel ve ekonomik olanı, hafif agregalarla yapılan üretimdir. Hafif betonlar üretildikleri agreganın adına göre isim alırlar; bims betonu, uçucu kül betonu, genleştirilmiş kil betonu ve odun talaşı betonu gibi. Bims veya talaş betonlarında, bims ve talaş agregaları yanında, gerektiğinde belirli oranlarda doğal kum ilave edilerek de hafif beton üretilmektedir. Beton içine genleştirme özelliği olan kimyasal bileşenler katılarak da hafif beton elde edilmektedir (Şimşek 2012).

Gazbeton, ince taneli ve silis kökenli bir agregada ve inorganik yapıdaki bağlayıcı (kireç veya çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturunca bir madde katılarak hafifletilmesi yolu ile elde edilen hafif betondur (Şimşek 2012).

Hafif betonlar, atık maddeleri dönüştürmek veya yapı elemanında akustik, termal ve hafiflik gibi özelliklerin arandığı durumlarda yapılan betondur. Hafif betonun kullanılması, yapı elemanında ses, ısı yalıtımı ve ölü yükün azalması gibi konularda önemli ölçüde yarar sağlamaktadır. Yapı elemanı öz ağırlığının azalması, kesitlerde küçülme ve daha az donatı gereksinimi sağlar. Yapı elemanının öz ağırlığının azalmasına bağlı olarak depremlerden daha az etkilenerek can ve mal kaybının en aza indirilmesini sağlayacaktır. Yalıtım için farklı bir malzeme tercih edilmeyeceğinden dolayı da ekonomiklik sağlanacaktır. Yangına ve donma çözölmeye karşı dayanımı oldukça üst seviyelerdedir. Çünkü beton içinde var olan birbirinden bağımsız boşluklar, su ile tamamen dolmadığından donma-çözölme etkisinin oluşturabileceği içsel gerilmelerden etkilenme oranını azaltıcı yönde tesir edecektir (Şimşek 2012).

2.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Birim hacim ağırlık ve dayanım arasında var olan ilişki hafif betonların sınıflandırılmasını belirleyen en önemli etkenler olup, sınıflandırma genelde birim hacim ağırlık ve dayanım koşuluna göre yapılmaktadır (Neville 2011). İzolasyon betonlarından taşıyıcı olanlara kadar tüm hafif betonların özellikle birim ağırlık değerleri bakımından farklı sınıflandırılmaları yapılmıştır.

Hem birim ağırlık hem de dayanıma bağlı olarak yapılan sınıflamaya göre birim ağırlığı 1840 kg/m^3 'ü geçmeyen ve 28 günlük silindirik basınç dayanımı 18 MPa'yı aşan betonlar taşıyıcı hafif beton sayılırlar. Hafif betonların birim ağırlıkları $300\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişmektedir. Taşıyıcı olan hafif betonlarda ise bu değer $1450\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$ arasında olup, çoğunlukla $1600\text{-}1700 \text{ kg/m}^3$ aralığında olmaktadır (Topçu 2006).

Birim ağırlığı farklı değerlerde değişen hafif betonların sahip oldukları basınç dayanımları da ele alındığında Çizelge 2.1'deki gibi sınıflandırmak mümkündür. Bu betonlardan S1 sınıfından ısı izolasyonu sağlanmasının yanı sıra taşıyıcı olarak da yararlanılır. S2 ve S3 betonları orta dayanımlı betonlardır, yalıtım özellikleri de vardır. S4, S5 ve S6 betonları ise taşıyıcı hafif betonlardır. Bunlar birçok ülkede taşıyıcı beton olarak kabul edilirler. Taşıyıcı olarak tasarlanmayan S1 ve S2 sınıfına ait olanlar duvar malzemesi olarak kullanılabilir. Böylelikle yapının toplam ağırlığında önemli bir azalma gerçekleşmesiyle deprem dayanımını da belirgin oranda katkı sağlanır. S4 ve üstü için endüstriyel yolla üretilen yapay hafif agrega kullanılmalıdır (Topçu 2006).

Çizelge 2.1 Hafif beton sınıfları (Topçu 2006).

Hafif Beton Sınıfı	Birim ağırlık, kg/m^3	Basınç Dayanımı, MPa
S1	≤ 800	1-7
S2	800 – 1200	7-10
S3	1000 – 1400	10-14
S4	1300 – 1800	14-25
S5	1500 – 1800	25-40
S6	1800 - 2000	40-70

2.1.2 Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, onu meydana getiren bileşenlerin tüm özellikleriyle ilişkilidir. Dayanım, betonun en önemli özelliklerinden bir tanesi olup genel olarak betonun birim ağırlığı ile doğrudan ilişkilidir. Hafif betonlar değişik sınıflarda olup, özellikleri tercih edilen agregalara ve karışımdaki bileşenlere bağlıdır. Beton sertleştiğinde hacminde değişiklikler meydana gelecektir. Bu değişimler fiziksel ve mekanik özelliklerle ilişkili olup, şu şekilde sıralanmıştır;

- Dayanım
- Elastiklik
- Yoğunluk
- Su emme
- Yüksek sıcaklık etkisindeki değişimler
- Aşınma direnci (Çalışkan 2015).

2.1.3 Hafif Betonların Avantajları

Hafif betonların başlıca avantajları şunlardır;

- Hafif betonların yapı üretiminde tercih edilmesi yapının zati yükünü azaltıcı yönde etki yaratır.
- Hafif betonların kullanılmasıyla betonarme elemanların kesitleri de azaltılabilir.
- Kalıp basıncında meydana gelecek azalma sayesinde kalıp kesitlerindeki değişikliğe bağlı olarak, iskele ve kalıp maliyetlerinde azalış yaratır.
- Hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları oldukça düşük değerlerdedir.
- Yangına karşı dirençlidirler.
- Nakliye ve uygulama işlemlerinin kolay olması, endüstriyel üretim imkânında kolaylıklar sağlar.
- Ses yalıtımları yüksektir (Savaş 2013).

2.1.4 Hafif Betonların Dezavantajları

Hafif betonların bazı dezavantajları şunlardır;

- Boşluklu bir yapıya sahip olmaları dayanım değerinde istenilen seviyeye ulaşmada etki yaratacaktır.
- Aşınma dayanımı değerleri düşük seviyelerdedir.
- Segregasyon riski fazladır.
- Nemli durumlara karşı önlem alınması gerekebilir.
- Su ve nem etkisine karşı yalıtıma ihtiyaç duyarlar.
- Elastisite modülleri düşük olduğundan normal betonlara göre daha fazla şekil değiştirirler (Kozak 2010).

2.2 Gazbeton

Gaz beton; silis oranı yüksek kum (kuvars, kuvarsit vb), alçıtaşı, kireç, çimento, su ve gözenek oluşturuıcı katkı maddesi (alüminyum tozu) ile oluşturulan karışımın otoklavlarda basınçlı buharla sertleştirilmesiyle elde edilen gözenekli, hafif beton sınıfında yer alan yapı malzemesidir. Gazbeton, beton veya geleneksel kâgir malzemelere göre oldukça hafif olup içindeki hava kabarcıkları sebebiyle yüksek ısı yalıtım özelliğine sahip, inşaat sektöründe hafif beton grubunda oldukça tercih edilen yapı malzemesidir. Bünyesindeki hava kabarcıkları sebebiyle bu malzemeye gazbeton adı verilmiştir. İngilizce adı "Autoclaved Aerated Concrete - AAC", Almanca adı "Porenbeton" dur (Borhan 1987).

Doğal malzemelerden yapay taş üretimi çok eski dönemlerden beri yapılagelmektedir. Ancak önemli gelişmeler geçen yüzyılın sonlarında olmuştur. Önceleri istenilen dayanıklılığın kısa sürede sağlanabilmesi için buhar kürünün çözüm olabileceği görülmüş, sonrasında ise doygun buhar yardımı ile 100 °C'nin üzerinde gerçekleştirilen kürleme işleminin başta basınç dayanımı olmak üzere malzemenin özelliğini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Çimentaş 1998).

Gazbeton yapı elemanlarının önemli özelliklerinden biri gözenekli yapıya sahip olmalarıdır. Betona gözenekli bir yapı kazandırma fikri ilk kez E. Hoffman tarafından ortaya atılmıştır. 1889-1925 yılları arasında bu konuda önemli adımlar atılarak pek çok gözenek oluşturma yöntemi üzerinde çalışılmıştır. Bunlar arasında J.W. Aylswort ile

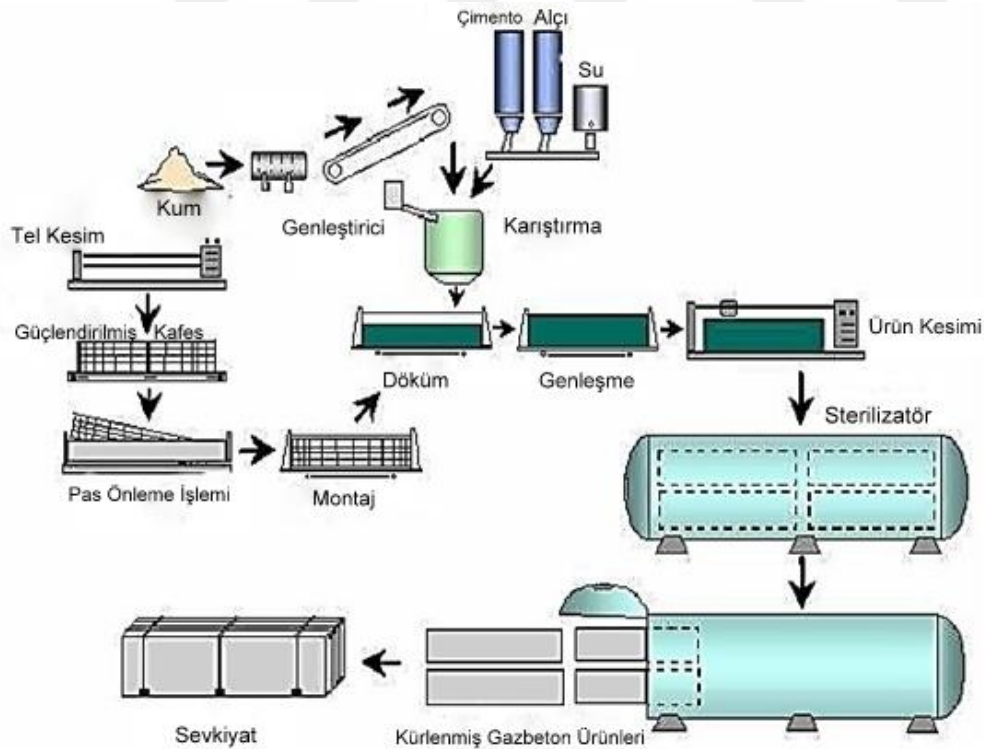
E.A. Dyer'in birlikte geliştirdikleri alüminyum veya çinko tozu kullanılmasını öngören yöntem en çok benimsenen yöntem olmuştur (Çimentaş 1998).

Yapay yapı taşlarının önce gözenekli bir dokuya kavuşturulması daha sonra da buhar küşü yardımı ile dış etkilere karşı dayanıklı hale getirilmesi yönünde en önemli adım ise J.A. Eriksson tarafından atılmıştır (Çimentaş 1998). Eriksson; ahşabın özelliklerine sahip -yüksek ısı yalıtımı sağlayan, sağlam, kolay işlenebilen, yanmayan ve çürümeyen bir yapı malzemesi arayışı içindeydi. O dönemde, ısı yalıtım özelliği kötü, küçük ebatlı ve ağır yapı blokları kullanılmaktaydı. Eriksson, yaptığı çalışma ve araştırmaların sonunda, kuvarsit, kireç ve suyla, olduķa gözenekli bir malzeme üretmeyi başardı. Bütün dünyada, neredeyse sınırsız miktarda ve yaygın olarak bulunan bu hammaddeler, çok sayıda gözeneği olan bir yapı malzemesi elde etmek için procesten geçirilmekteydi. Johan Axel Eriksson, daha sonra literatür adı gazbeton olarak anılacak buluşunu 1924 yılında bu malzemeyi geliştirdiği yerin adı olan küçük İsveç kasabası Yxhult ile, İsveç dilinde beton anlamına gelen betong kelimesinin karışımından elde edilen YTONG adı ile patentlendirdi (Akgül 2010).

2. Dünya Savaşı gazbetonun hızlı gelişmesini geçici bir süre durdurmuştur. Fakat 1950'den sonra Avrupa ve Dünya'nın başka birçok yerinde hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır. Bu gelişimi gazbeton üretiminde etkili bir yeri olan YTONG firmasının gelişim süreci takip etmiştir (Kartal 2001). Ytong, 2. Dünya savaşından sonra hafiflik ve enerji tasarrufundan dolayı, Alman ekonomi Bakanı Ludwig Erhard desteğiyle Almanya konut yapımında önemli rol almıştır. Ytong'un endüstriyel üretiminin başlamasının ardından birçok rakip de bu sahada faaliyete geçmiştir. O tarihten bu yana, Almanya merkezinde yapılan devamlı araştırmalar sayesinde, Ytong en ileri teknolojiye ulaşmış ve dünyada yaygın olarak en fazla kullanılan gazbeton olmuştur. Ülkemizde gazbeton yapı elemanları ilk olarak 1950'lerde Hilton Oteli inşaatında, Almanya'dan ithal edilerek uygulanmıştır. Bilahare, 1960'larda ilk Ytong fabrikası İstanbul Pendik'te, üretime geçmiştir. Bugün dünyada, proses ve kalite olarak bazen birbirinden çok farklı, 50'ye yakın, gazbeton markası mevcuttur (Akgül 2010).

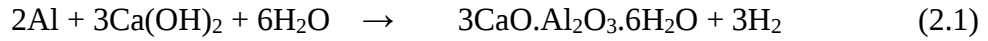
2.2.1 Gazbeton Üretimi

Gazbeton üretiminde farklı formüller uygulanmasına rağmen temel hammaddeler Portland çimentosu, sönmemiş kireç, alüminyum tozu ve büyük bir oran işgal eden silika bakımından zengin malzeme (genellikle kum veya çakıltası) olarak belirtilebilir. Portland çimentosu farklı bir üretim prosesinden gelen, kalsiyum silikon, alüminyum, demir cevheri ve küçük oranlarda başka materyallerden üretilen ve betonun temel hammaddesi olan bir üründür. Yukarıda gazbeton için sayılan temel hammaddeler ilk aşamada sulu bir karışım haline getirilerek cidarları yağ ile kaplanmış kalıplara dökülür. Alüminyum tozu, hidrojen gazı kabarcıkları oluşturmak üzere kimyasal reaksiyon gerçekleştirir. Oluşan bu mikroskobik, birbirlerinden bağımsız hücreler malzemenin hacimce iki katına ulaşmasını sağlayarak, hücreli hafif beton niteliğini ortaya çıkarır. 30 dakika ile 4 saat arasında değişen bir sertleşme bekleme süresi sonunda köpük benzeri malzeme, kesim sertliğine ulaşmış olur. Bloklar halinde kesilen malzeme buhar kürüne tabi tutulmak üzere otoklavlara yerleştirilir (Karaaslan 2009) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Gazbeton üretim tekniği (Aker 2011).

Bir somun ekmek yaparken ekmek artışı sağlamak için hamur karışımına maya ilave edilir. Benzer şekilde betonun hacmini artırmak için de beton karışımına bir genleşme ajanı eklenir. Gazbetonda, kullanılan genleşme ajanı alüminyum tozu veya macunudur. Alüminyum, karışımdaki kalsiyum hidroksit ve su ile reaksiyona girerek milyonlarca minik hidrojen kabarcığı oluşturur. Bu işlem aşağıdaki kimyasal denklem (2.1) ile gösterilebilir (Domingo 2008).



Alüminyum tozu + Sönmüş kireç → Trikalsiyum Alümina Hidrat + Hidrojen

Bu işlem sırasında oluşan hidrojen gazı kabarcıkları karışımın dışına çıkarak hava ile yer değiştirir. Hidrojen havadan daha hafif bir gaz olduğundan kabarma işlemi devam ederken hava ile yer değiştirir. Alüminyum tozu, karıştırma işlemi sırasında eşit şekilde tüm karışıma dağıtılır. Hidrojen kabarcıklarının oluşması karışımın genişlemesine neden olur ve karışımın hacmi normal hacminin yaklaşık iki ila beş misli artar. Bu hacim artışı, karışımdaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girmesi için verilen alüminyum toz / macunun miktarına bağlıdır. Daha az genleşme, daha yoğun ve mukavemeti yüksek bir malzeme üretilmesine, genleşmenin fazla olması ise yoğunluğun ve mukavemetin düşmesine sebep olur. Gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan mikroskobik boşluklar, gazbetona hafifliği ve yüksek termal direnç özellikleri gibi diğer yararlı malzeme özelliklerini verir (Domingo 2008).

Otoklav, betonun hidratasyon sürecini hızlandırmak için 180°C civarındaki yüksek basınçlı buharı kullanarak gazbetona mukavemetini, rijitliğini, ölçüsel kararlılığını veren ikinci bir kimyasal reaksiyonu tetikler. Normal bir betonun 28 gün boyunca 21 °C'da ıslak küre maruz kalarak erişebileceği bir sertliğe, otoklavlama sayesinde 8 ila 14 saat arasında ulaşılabilir (Karaaslan 2009). Bu malzeme otoklavda 6-12 saat arası buhar kürüne tabi tutulur. Malzemenin sertleşmiş harç yapısı genellikle kalsiyum silikat hidrat'dan oluşmaktadır (Kosmatka *et al.* 2003). En sık rastlanan 11 A⁰ Tobermorit (C₅S₆H₅) kristalidir. Kısmi olarak da Xonotlit (C₆S₆H), Gyrolit (C₂S₃H₂), Hillebrandit (C₂SH) ve Afwillit (C₃S₂H₃) kristallerine rastlanır (Çiçek 2002). Gözenekli bu yapı malzemesinin yoğunluğu 300 ile 1000 kg/m³ arasında olup basınç dayanımı 2.5 ile 10

MPa arasındadır. Yüksek makrogözenek içeriğinden dolayı malzemenin ısı iletkenliği 0.15-0.20 W/mK arasındadır (Kosmatka *et al.* 2003).

Otoklav kürü gazbetonun basınç dayanımını ciddi oranda geliştirmekte olup tobermorit kristalleri de yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle oluşmaktadır. Bu anlamda nihai dayanım değeri otoklav içerisindeki rejime göre değişmektedir (Narayanan and Ramamurthy 2000). Gazbetonun birçok fiziksel özelliği birim ağırlığına bağlı olup, bu özelliklerin sınıflandırılmasında birim ağırlık esas alınır. Gazbetonun birim ağırlığı ölçülürken mevcut nem durumu bilinmelidir. Malzeme otoklav kürü işlemi sonrasında kuru ağırlığından daha ağırdır. Bu değer birim ağırlık değeri az olan gazbeton örneklerde %45'den daha fazla olacak şekilde gerçekleşebilir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Gazbeton yapı bileşenleri üretilirken teçhizatlı olup olmadıklarına göre, yapı malzemesi ve yapı elemanı şeklinde iki grupta sınıflandırılmaktadır. Birim hacim ağırlık ve basınç dayanımına göre ise 5 gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.2'de verilmiştir (TS 453 1988).

Çizelge 2.2 Gazbetonun B.H.A ve basınç dayanımına göre sınıflandırılması.

Sınıfı	Ortalama En Küçük Basınç Mukavemeti Değeri (MPa)	En Küçük Basınç Mukavemet Değeri (MPa)	Birim Hacim Ağırlıklar kg/m ³	Ortalama Birim Hacim Ağırlığı kg/m ³	Sınıf İşareti
G1	1.5	1.0	400	310 ile 400	G1/ 0.4
			500	410 ile 500	G1/ 0.5
G2	2.5	2.0	400	310 ile 400	G2/ 0.4
			500	410 ile 500	G2/ 0.5
G3	3.5	3.0	500	410 ile 500	G3/ 0.5
			600	510 ile 600	G3/ 0.6
G4	5.0	4.0	600	510 ile 600	G4/ 0.6
			700	610 ile 700	G4/ 0.7
G6	7.5	6.0	700	610 ile 700	G6/ 0.7
			800	710 ile 800	G6/ 0.8

2.2.2 Gazbeton Özellikleri

2.2.2.1 Gazbetonun Fiziksel Özellikleri

Malzeme bünyesinde çapları 0,5 mm ile 1,5 mm aralığında değişen küresel makro gözenekler vardır. Bu gözenekler ayrıca mikro gözenekler ile çevrelenmiştir. 470 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlıktaki malzemenin ihtiva ettiği boşluk miktarı hacminin takriben %80'idir. Katı madde-boşluk oranı malzemenin yoğunluğunu ve tüm fiziksel özelliklerini belirler. Malzemenin rengi kullanılan silisli hammaddenin orijinine göre beyaz, gri veya pembe olabilir (Borhan 1987).

2.2.2.2 Gazbetonun Kimyasal Özellikleri

Gazbetonların pH'ı 9,5-11 aralığında olup, silika hidratlardan oluşan alkali kimyasal yapıya sahiptirler. Bu nedenle asidik nitelikteki bölgelerden olumsuz etkilenebilirler. Sülfirik asit, hidroklorik asit, asetik asit yapıya zarar verir. Bu bakımdan deniz suyuna karşı korunmalıdır (Borhan 1987). Gazbetonun dayanımını sağlayan hidro silikatlar suda çözünmezler. Fakat üretime giren diğer hammaddeler suda çözünebilen tuzlar içerirlerse, ortam şartlarına bağlı olarak bu tuzlar malzeme yüzeyinde kristalleşerek çiçeklenme oluşturabilirler (Çiçek 2002).

2.2.2.3 Gazbetonun Mekanik Özellikleri

Gazbetonun basınç mukavemeti ile kuru birim hacim ağırlığı arasında doğrudan bir bağlantı vardır. Bünyesinde ihtiva ettiği rutubete bağlı olarak basınç mukavemeti değişikliğe uğrar. Bu değişim tam kuru malzeme ile suya doymuş malzeme arasında %35 mertebesinde (Borhan 1987). Gazbetonun mukavemet değerini etkileyen bileşenler içinde numune şekli ve boyutu, boşluk oluşturma metodu, yükün yüklenme yönü, numunenin yaşı, su içeriği, kür tekniği gibi değişkenler vardır. İç bünyedeki gözenek oluşumu ve gözenek duvarları gazbetonun basınç dayanımı değerine direkt etki eder. Basınç dayanımı değeri ve birim ağırlık değeri birbiriyle doğrusal oranda ilişkilidir. Bu durumun nedeni, gözenek oluşumundaki azalma sonucu birim ağırlığın artış göstermesidir (Ünverdi 2006).

2.2.3 Gazbeton Ürünleri

2.2.3.1 Donatısız Gazbeton Ürünleri

Duvar Blokları, kâgir yapılarda ve betonarme sistemlerde duvar imalatında kullanılırlar. İnce bir sıva tabakası ile kaplanmaları yeterlidir. İki alt gruba ayrılırlar. Düz duvar ve geçmeli duvar bloklar olarak.

Asmolen bloklar, yüksek dış yüksekliğinde, dolgulu dişli döşemelerin oluşturulmasında, ortalama ısı geçirgenlik direnci yüksek dişli döşemelerin oluşturulmasında kullanılır. U bloklar, duvarların içinde olması gereken, betonarme hatıl, kolon veya kirişlerin üretilmesinde ahşap kalıp yerine tercih edilirler. Böylece ortaya çıkması olası ısı köprüleri de izole edilmiş olur. Özellikle yığma yapıların duvar üst betonarme hatlarının üretiminde kullanıldığında, dış ve iç duvar yüzeylerinde homojen bir yüzey oluşumu sağlanır. Yüksek duvarlarda, çatı kalkan duvarlarında, baca üretiminde, yağmur iniş borularının gizlenmesinde, yangın duvarları yapımında betonarme yapıların gizlenmesinde kullanılır.

Yalıtım Plakları, ısı yalıtımı yetersiz kalan, eski veya yeni dış duvarların ısı yalıtımında, ısı köprülerinin ortadan kaldırılmasında, üzerinde gezinilen yüzeylerin yalıtılmasında kullanılır (Akgül 2010).

2.2.3.2 Donatılı Gazbeton Ürünleri

Taşıyıcı olmayan gazbeton elemanlar 4 kısımdan oluşur. Bunlar; düşey duvar, yatay duvar, bölme duvar, kapı-pencere lentoları olarak ayrılmıştır. Düşey duvar elemanları, rüzgâr yüküne karşı mukavemetli olması istenen dış duvarlarda, 6 m açıklığa kadar taşıyıcı olmayan iç ve dış duvarlarda, taşıyıcı betonarme veya çelik iskeletin giydirilmesinde, bölme duvar oluşturulmasında, sanayi ve ticari yapıların oluşturulmasında kullanılır.

Yatay Duvar Elemanları, düşey duvar elemanları ile aynı yerde üretilip aynı şekilde kullanılır. Bölme Duvar Elemanları, küt veya zıvana profili şeklinde üretilirler. Konut,

sanayi, ticari yapılarda taşıyıcı olmayan hafif duvar oluşturmada kullanılırlar. Bu duvarlar gerektiği zaman sökülebilir. Kapı-Pencere lentoları, kapı ve pencere üstlerinde kullanılan her iki tarafta da eşit yükseklikte olan ürünlerdir. Taşıyıcı olan elemanlar ise taşıyıcı duvar ve taşıyıcı çatı elemanları olarak ikiye ayrılır.

Taşıyıcı duvar elemanları, en fazla 3 tam kata kadar konut veya büro yapılarında kullanılır. Ateşe dayanıklı taşıyıcı duvar oluşturmada, yangın duvarı oluşturmada, havalandırmalı dış duvarların, iç tabakasında, bodrum kat taşıyıcı dış duvarlarda, baca oluşturmada kullanılır. Taşıyıcı çatı ve döşeme elemanları, dinamik yüklerin etkilemediği döşemelerde, sanayi ve ticaret yapılarının sıcak ve soğuk düz çatı uygulamalarında kullanılır (Akgül 2010).

2.2.4 Gazbetonun Sağladığı Yararlar

2.2.4.1 Gazbetonun Tasarımda Sağladığı Yararlar

Gazbetonun standart boyutlarda üretilmesi sonucunda projelendirme esnasında modüler tasarıma imkân sağladığından gazbeton tasarımda daha baştan kolaylık sağlamaktadır. Yalıtım özelliğinden dolayı dış duvar kalınlıklarını azaltacağından iç mekân kullanım alanlarına 100m²'de 4-5m² alan kazandırmaktadır. Gazbeton elemanlar düşük birim ağırlıkları sayesinde taşıyıcı elemanlara etki edecek yükte azalmaya sebep olur ve taşıyıcı eleman tasarımında daha küçük kesitli elemanların oluşumuna ve böylelikle de yapı üretiminde avantaj sağlamaktadır (Kömürlü ve Önel 2007).

2.2.4.2 Gazbetonun Yapımda sağladığı Yararlar

Gazbeton elemanlarla duvar oluşturmak ve duvar üzerinde uygulanacak mantolama gibi farklı nitelikteki işleri gerçekleştirmek çok kolaydır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesi duvar imalatında tercih edilecek diğer malzemelerle yapılacak uygulamalara göre daha az işçilik gerektirir, böylece imalat ve işçilik uygulamalarında ekonomik avantaj yaratmakla birlikte imalat süresinde de zamandan yana kazanç yaratır. Bu noktalar değerlendirildiğinde gazbeton elemanların yapı üretiminde kullanılması doğru ve

ekonomik olacaktır. Gazbeton elemanların 8 adeti ile 1 m² duvar imalatı gerçekleştirilebilmesi, işçilik ve zaman avantajını açıklamaktadır. Kâgir sistemlerde betonarme döşeme yerine gazbeton elemanlarla döşeme yapımı da zaman, maliyet ve işçilik konularında oldukça avantaj yaratacaktır (Kömürlü ve Önel 2007).

2.2.4.3 Gazbetonun Yapıda Sağladığı Yararlar

Gazbeton elemanlar diğer duvar elemanlara göre daha hafif malzemelerdir. Gazbeton elemanların hafiflikleri üretim metodolojisine bağlı gözenekli yapısından kaynaklanmaktadır. Bu durum, nakliye ve üretim uygulamalarında avantaj yaratmakla birlikte yapıya etki eden yüklerin azaltılmasında da önemli rol oynar. Böylece endüstriyel uygulamalarla birlikte, okul, konut hastahane yapımı gibi farklı spesifik uygulamalarda kullanılabilirler. Gözenekli yapıya sahip olmaları sebebiyle yalıtım özellikleri de gelişmiştir (Kömürlü ve Önel 2007).

İyi dizayn edilmiş konfor düzeyi yüksek alanların oluşturulması duvar elemanı olarak tercih edilecek malzemelerin izolasyon özelliklerinin yanında difüzyon özelliklerine de bağlıdır. Gazbeton elemanların gözenekli yapıları sebebiyle difüzyon kabiliyetleri de gelişmiş olup kullanıldıkları ortamın nefes almasına yardımcı olarak konfor düzeyinde artış sağlarlar. Gazbeton elemanların insan sağlığına etki edebilecek herhangi bir olumsuzlukları bulunmamakla birlikte üretim tekniği olarak oldukça ekolojik materyallerdir (Kömürlü ve Önel 2007).

2.3 Zeolit

Günümüz teknolojisinin çoğalarak artan hammadde ihtiyacının en çok hissedildiği alanlardan biri endüstriyel hammaddeler olmuştur. Bunlar arasında ise oldukça fazla araştırmaların yapıldığı ve arka arkaya buluşların birbirini takip ettiği hammaddelerden biri zeolittir. Zeolitler mineralojileri ve kimyasal özellikleri sebebiyle günümüz endüstrisinde kullanılabilen hammaddelerdendir (Öcal 2014).

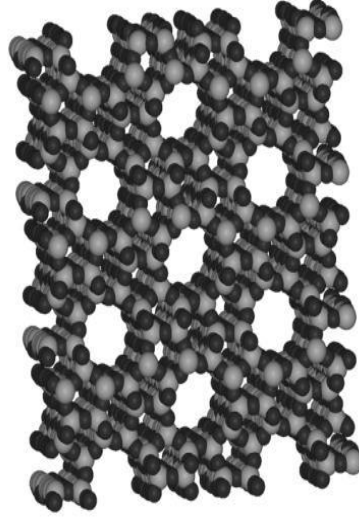
Zeolitler ilk kez 1756 yılında İsveçli mineralog A.F. Cronstedt tarafından keşfedilmiştir (Auerbach *et al.* 2003). Keşfettiği zeoliti ısıttığında hızlı şekilde su kaybeden yapısından

dolayı Latince “zeo” ve kaya parçalarının ısıtılmasına da “lithos” denilmesinden dolayı malzemeye zeolit adını vermiştir (Karaüç 2008). Zeolitler alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip sulu alüminyum silikatlarıdır (Kurt ve Arık 2015). Doğada doğal halinin bulunmasının yanı sıra farklı kimyasal öncüler ve hammaddeler kullanılarak da sentezlenebilirler (Bukhari *et al.* 2015). Üç boyutlu çerçeve yapısına sahip olan zeolitler antik çağlardan beri inşaatlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte puzolanik çimentoların imalatında popüler doğal puzolanlardan biri olarak uygulanması 20. Yüzyılın ilk yarısından itibaren başlamış ve son yıllarda giderek artan bir eğilim göstermektedir (Najimi *et al.* 2012).

Zeolitlerin endüstriyel kullanım potansiyellerinin 1940’lı yıllarda açığa çıkmasına rağmen, doğal zeolitlerin o yıllarda sadece volkanik kayalar içerisindeki oluşumlarının bilinmesi, bu nadir bulunan kristallerin koleksiyonlarda ve yer bilimi müzelerinde kalmalarına neden olmuştur. 1950’li yıllarda X-Ray analiz tekniğinin kullanımının ardından sedimanter kayalar içinde, özellikle klinoptilolit mineralinin yaygın varlığı ve spesifik özelliklerinin belirlenmesinin ardından, doğal zeolitler artan bir gelişimle endüstriyel kullanım alanı bulmuştur (Kurama 1994). Zeolit önemli kullanım alanları arasında su sertliğinin azaltılması, gaz ve petrol işleme merkezleri, atık su temizlemesi ve kâğıt endüstrisidir. Zeolit volkanik kökenli olması ve amorf yapılı yüksek silis içeriği puzolanik aktivitesini ortaya çıkarmaktadır (Karakurt 2008). Zeolitler, hafif yoğunluklu, yüksek gözenekli, homojen sıkı ve sağlam yapıdadırlar. Puzolanik özellik gösterebilecek olması, iyon değişikliği yapabilme, adsorbsiyon gibi özellikleri sebebiyle inşaat sektörü de dahil olmak üzere pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir (İnt. Kyn. 1).

Zeolitler antik zamandan buyana genellikle inşaat alanında yapı taşı olarak tercih edilmiştir. Ancak son dönemlerde hafif agrega ve çimento katkı malzemesi olarak kullanımı ele alınmaya başlanmıştır (Turanlı vd. 2007). Bunun sebebi zeolitlerin puzolanik özellik gösterebilme kapasiteleri, camsı yapılı doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar gibi diğer mineral katkı malzemelerine kıyasla daha yeni oluşları ve sadece diğer puzolanların kullanılabilirliğinin kısıtlı olduğu yerlerde yaygın olarak kullanılmalarıdır (Colella *et al.* 2001).

Zeolitler kafes yapılarında alüminyum, silis ve oksijen, gözeneklerinde ise katyon ve su içeren mikro gözenekli kristal katılardır. Silis ve alüminyum atomları ortak oksijen atomu sayesinde birbirlerine tetrahedral olarak bağlanmışlardır (Şekil 2.2) (Gülen vd. 2012).



Şekil 2.2 Zeolitin mikroyapısı.

Alkali ve toprak alkali metallerin kristal yapıya sahip sulu alümina silikatları olup çerçeve silikatlar grubundadır. Mineral türü olarak 1750'lerden günümüze bilinmekle birlikte kristal yapıları, teknolojinin gelişme göstermesiyle birlikte ancak 1930'larda çözümlenebilmiştir. İskelet yapılarındaki Si/Al oranlarındaki ve içerdikleri katyon cinsi ve miktarlarındaki bazı farklılıklara rağmen;



genel formülü (2.2) ile ifade edilebilirler. Burada M^+ bir alkali katyon olup genellikle Na^+ veya K^+ , nadiren de Li^+ olur. M^{+2} ise bir toprak alkali katyondur ve genellikle Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+2} nadiren de Ba^{+2} , Sr^{+2} olur (Gülen vd. 2012).

2.3.1 Zeolitlerin Oluşumu

Zeolitlerin oluşumu, oluşum ortamlarına göre altı grupta toplanmıştır;

- a) Kapalı göllerde volkanik malzemenin birikmesi ve göl suyu ile reaksiyonu sonucu oluşan yataklar.
- b) Kapalı veya açık göllerde volkanik malzemenin birikmesi ve göl suyu ile kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan yataklar.
- c) Kıyıda veya derin denizel ortamda volkanik malzemenin birikip deniz suyu ile reaksiyonu sonucu oluşan yataklar.
- d) Düşük ısılı gömülme metamorfizması sonucunda, Al-Si'lu sedimanter ya da volkanik malzemelerden oluşan zeolit yatakları.
- e) Hidrotermal ya da sıcak kaynak sularının Al-Si'lu malzemeye etkisi sonucu, bu malzemenin bozulması sonucu oluşan yataklar.
- f) Genellikle 2. zaman tortulları arasında görülen ve orijinlerinin volkanik olup olmadığının belirlenemediği, denizel veya gölsel ortamlarda oluşan zeolit yatakları
- Çizelge 2.3'de doğal zeolitlerin oluşumunda sıcaklığın etkisini göstermektedir.

Çizelge 2.3 Doğal zeolitlerin oluşumu (Gülen vd. 2012).

Oluşum Tipi	Sıcaklık (°C)	Cinsi
Derin deniz çökeltileri	4-50	Filipsit, Klinoptilonit, Analsim
Bozunma		Filipsit, Klinoptilonit, Şabazit, Erionit, Mordenit
Alkali ve Tuzlu Göller		Gismodin Fojasit, Gonaidit, Natrolit, Analsim
Süzülen yer altı suları (bazik tefra)	20-50	Holandit
Süzülen yer altı suları (asidik tefra)		Filipsit, Şabazit, Erionit, Mordenit, Tomsonit, Mesolit
Sığ gömülme diyajenezi (Düşük ısıli hidrotermal)	25-100	Skolesit, Holandit, Stilbit
Deniz gömülme diyajenezi (Orta ısıli hidrotermal)	100	Lamonit, Analsim
Düşük metamorfizma	200	Warakit, Yugovaratit, Analsim
Primer magmatik		Analsim

2.3.2 Zeolit Rezervleri ve Kullanım Alanları

Zeolitlerin endüstriyel alanlardaki fonksiyonellikleri 1940'lı yıllarda açığa çıkmasına

rağmen, zeolitlerin o yıllarda yalnızca volkanik kökneli oluşumlarının bilinmesi ve gerek birden fazla mineralin bir arada bulunması sebebiyle tek mineral olarak ayrılmalarındaki zorluk, gerekse de teknolojik özellikleri anlamındaki bilgi eksikliği araştırmaların sentetik zeolitler üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur. 1950'li yıllara ulaşıldığında inşaat sektöründeki sınırlanan zeolitlerin endüstriyel uygulamaları, sedimanter yataklar içerisindeki büyük miktarlardaki zeolit kaynaklarının açığa çıkarılmasından sonra, araştırmacıların yoğun ilgileri ile spesifik özelliklerinin belirlenmesinin ardından artan bir gelişim göstermiştir (Yıldırım 2007).

Doğal zeolitlerin kullanım alanları aşağıda verildiği gibi özetlenebilir (İnt. Kyn. 1).

Bulk Uygulamaları:

- Kâğıt dolgu maddesi
- Çimento katkısı
- Yapı taşı
- Hafif agrega gübre ve toprak düzenleyici
- Hayvan yemi katkısı
- Antibiyotik malzeme ve dış macunu katkı maddesi
- Seramik malzeme katkısı

Adsorpsiyon / iyon Değişimi Uygulamaları:

- Havadan oksijen ve nitrojen ayrımı
- Oksijen üretimi
- Kömürün gazlaştırılması
- Baca gazı temizlenmesi (SO₂, CO₂)
- Kurutma ve saflaştırma işlemlerinde (asite dayanıklı adsorbent olarak)
- Doğal gaz saflaştırılması
- Petrol ürünleri üretimi
- Pis koku önleme
- Nem içeriği kontrolü, nem çekici madde
- Güneş enerjisi toplama
- Doğal gaz taşıyıcı malzeme
- Petrol sızıntılarının temizlenmesi
- İyon değişimi uygulamaları
- Radyoaktif atık ayırma

- Atık ve kullanma sularının temizlenmesi
- Su kültürü
- Maden yataklarının aranması
- Metalürji

Zeolitler inşaat sektöründe ise aşağıda belirtilen şekilde kullanılmaktadırlar.

Puzolanik çimento ve beton: Zeolitler, çoğu ülkede puzolanik hammadde olarak tercih edilmektedirler. Zeolitler betonun korozyon etkisine kalabileceği ortamlar için tercih edilen hidrolik çimentolarda önemli uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca bu ip uygulamalarda yüksek silis içermeleri sebebiyle kireç kaynaklı durabilite sorunu yaratabilecek oluşumları engelleyebilmektedir.

Hafif Agregası: Zeolitler de perlit gibi hacimsel genişlemeye müsait malzemelerdir. Genleştirilmiş zeolitlerin aşınma dayanımları oldukça iyi seviyelerde olup, genleştirilmiş hafif agrega üretiminde de kullanılabilirler.

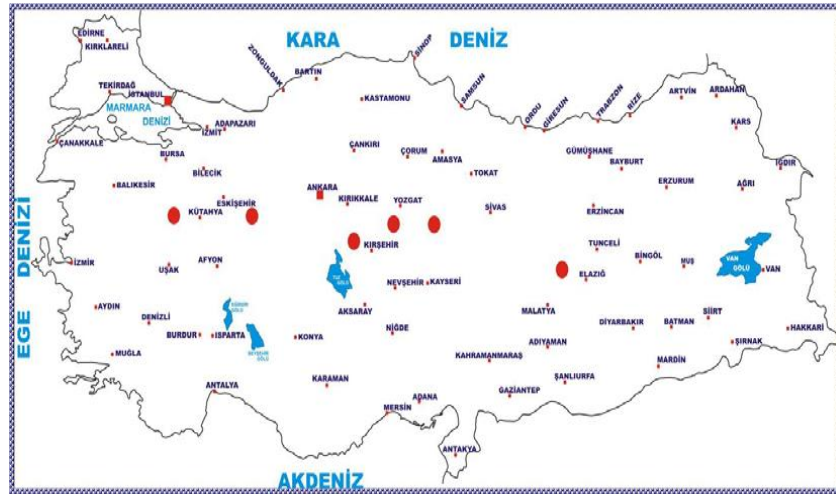
Boyutlandırılmış Taş: Zeolitler, düşük yoğunluklu, oldukça gözenekli, homojen, sıkı sağlam yapıdadırlar. Hafif ve kolay şekil verilebilme özellikleri sebebiyle yapı taşı olarak kullanılabilirler.

İtalya’da keşfedilemlerinden 2000 yıl önce yapı taşı olarak kullanılan zeolitler, 1750 yılından beri bilinmelerine rağmen yurdumuzda ilk doğal zeolit oluşumları 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarındaki analsim oluşumlarında bulunmuştur. Bunu Ankara’nın batısında bulunan analsim ve klinoptilolit yatakları izlemiştir. Ülkemizde genel olarak gözlenen zeolit türü daha çok klinoptilolit ve analsim olup, diğer doğal zeolit türlerine çok az rastlanmıştır (Yıldırım 2007).

Türkiye’de tespit edilen başlıca zeolit yatakları Balıkesir-Bigadiç, Kütahya, Gördes, İzmir-Urla, Kapadokya’dır. Bu tespit edilen yataklardan sadece Balıkesir-Bigadiç yöresindeki sahada yapılan çalışmalar sonucunda kolaylıkla işlenebilir nitelikte ve yaklaşık 500 milyon tonluk bir potansiyeli olduğu saptanmıştır (Gürkan 2006). Diğer yörelerde sistemli bir rezerv belirleme çalışmaları yapılmamıştır. Fakat büyük yataklara

sahip oldukları bazı araştırmacılarca ifade edilmektedir. Bugüne kadar yapılan son derece kısıtlı gözlemlere göre toplam rezervin 50 milyar ton civarında olabileceği belirtilmektedir (İnt. Kyn. 1).

Ülkemiz zeolitler açısından uygun jeolojik ortamlara sahip olmasına rağmen, ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında analsim oluşumları saptanmıştır. Daha sonra Ankara'nın batısında analsim ve klinoptilolit yatakları bulunmuştur. Volcano tortul oluşumlarının gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türleri yoğunlukta olup diğer türlere çok az rastlanılmıştır. Türkiye’de detaylı etüdü yapılmış tek zeolit sahası Manisa –Gördes civarındaki MTA ruhsatlı sahadır. Sahada 18 milyon ton görünür zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise, Türkiye’nin en önemli zeolit yatakları tespit edilmiş olup kolaylıkla işletilebilir. Nitelikte yaklaşık 500 milyon ton rezerv 1995 yılında tahmin edilmektedir. Diğer bölgelerde detaylı bir çalışma yapılmamış olup, ülkemiz genelinde toplam rezervin 50 milyar ton civarında bulunduğu tahmin edilmektedir (Sarıkaya 2006). Türkiye’deki zeolit yatakları ve tipleri Şekil 2.3’de verilmiştir (DPT 1996).



Şekil 2.3 Türkiye’deki zeolit yatakları (DPT 1996).

2.4 Metakaolin

Metakaolin (MK) veya yüksek reaktivite metakaolin olarak adlandırılan mineral katkı

maddesi, çimento ve beton endüstrisine nispeten yeni bir malzemedir (Bapat 2013). Metakaolin üretiminde ana ürün kaolin kilidir. Kaolin ince, beyaz ve geleneksel porselen üretiminde kullanılan kil mineralidir (Anuk 2011). Kaolin ismi, Çince ‘‘kao-ling’’ sözcüğünden türemiş olup, Çin’de Kingto-Çen yakınında kaolinin bulunduğu yüksek tepe anlamına gelmektedir. Çinliler porselen yapımında bu tepeden ürettikleri kili kullanmışlardır. Killer, feldspatça zengin magmatik ve volkanik kayaların, kimyasal ve mekanik değişimleri sonucu oluşan, sulu alüminyum, magnezyum, demir, kalsiyum, potasyum gibi elementlerin silikatlarıdır. Kaolin kili; granit, gayns, feldspat, parfir, syenit, pegmatit gibi primer eruptif (magmadan çıkıp donan) kayaların doğasal ve buna yardımcı fiziksel ve kimyasal etkenler ile aşınıp, bozunup, dağılıp, ufalanıp sürüklenmesi sonucu oluşmuştur (Şekil 2.4). Kayaların değişikliğine rüzgâr, su, buz, ısı değişimleri, yerkabuğu hareketleri, karbondioksit, humik asit, kükürt asitleri, flor ve hidrojen gibi asitli gazlar sebep olmaktadır. Deforme olan kayalar oldukları yerde kalabilir veya su, rüzgâr gibi doğa olayları ile çok uzaklara da taşınabilir (Çelikten 2014).



Şekil 2.4 Kaolin minerali (İnt. Kyn. 2).

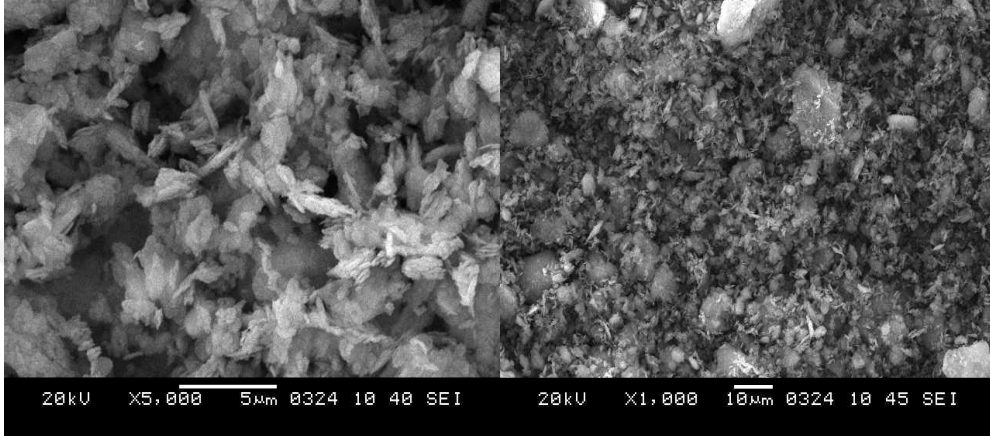
Meta öneki değişimi belirtmek için kullanılır. Bu örnek bilimsel olarak büyük ölçüde dehidrolize olmuş anlamında kullanılır. Metakaolin durumunda, değişiklik kilin üzerine ısı uygulaması tarafından belirlenen bir süre için ısı uygulanması sebebiyle kilin dehidroksilize olmasıdır. Kil mineralleri adsorbe suyunun çoğunu yaklaşık 100-200⁰C’de kaybeder. Dehidroksilizasyon ile su kaybı 500-800⁰C aralığında meydana gelir. Minerallerin bu termal aktivitesine kalsinasyon denir. Dehidroksilizasyon sonrası

sıcaklıkta, kaolinit iki boyutlu kristal yapısını korur ve bu ürüne metakaolin denir. Çimento ile yer değiştiren puzolan bir malzeme üretiminin sağlanması fazla sıcaklığı artırmadan dehidrolizasyon uygulanmasıdır. İyi bir işlem sonrası amorf yapıda yüksek oranda puzolanik metakaolin elde edilir. Başarılı işlemin sonucunda düzensiz, son derece puzolanik amorf bir yapı oluşur. Metakaolin üretiminde ana unsur daha yüksek sıcaklığa maruz bırakmadan kaolinin dehidrolizasyonunu sağlamaktır. Bu sıcaklığın üzerinde sinterlenmeye ve mullit yapının oluşmasına sebep olur ve reaktif özelliğini kaybeder (Tevrizci 2010).

Metakaolin, saflaştırılmış kaolin veya kaolinit killerinin belirli bir sıcaklık aralığında yakılması ve sonrasında yüksek inceliğe sahip olması amacıyla öğütülmesi sonucu elde edilen bir reaktif alümino-silikat puzolanıdır (Özer 2009). Kimyasal bileşenleri temel olarak SiO_2 ve Al_2O_3 tür. Bununla birlikte Fe_2O_3 , TiO_2 , Na_2O ve K_2O da az miktarlarda bulunur. Metakaolinin mineral katkı olarak çimento ve beton içerisinde kullanılması sonucu çimento ve betona sağlayacağı faydalar daha çok SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğine bağlıdır ve paralellik gösterir. Metakaolin, çok düşük geçirgenlik veya çok yüksek mukavemetin gerekli olduğu özel uygulamalarda kullanılır. Bu uygulamalarda, metakaolin daha çok çimento yerine ikame maddesi olarak kullanılır (Kosmatka *et al.* 2003). Metakaolinlerin çimento harcı içerisinde puzolan katkı olarak kullanımı 1960'lı yıllara dayanmaktadır. 1990'lı yıllardan itibaren ise dayanım ve durabilite özellikleri nedeniyle beton üretiminde tercih edilmesi yaygınlaşmıştır (Gültekin 2014). Metakaolin puzolan amaçlı çimento harcında ilk kullanımı 1962 yılında Brezilya'daki Jupia Barajı inşaatında gerçekleşmiştir (Girgin 2016). 1980'lerde metakaolinin çimento esaslı sistemlerde liflerle desteklenmiş kompozitler oluşturmaya yönelik bilimsel çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Ulu 2016).

Ticari amaçla kullanılan metakaolin $\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$ (metakaolinit) ve amorf veya az kristalli formdaki SiO_2 gibi aktif bileşikler içermektedir. Ancak, kaolin ve kaolinit killerinin suyunu tamamen kaybetmiş halleri tartışma konusu olmuştur. Eskiden, metakaolinin amorf alüminyum ve silika oksitlerinin karışımından meydana geldiği düşünülmekteydi. Daha sonraları ise metakaolinin, kaolinitin bazı bünyesel özelliklerini açığa vurduğu kanıtlandı (Hamalı 2007).

Metakaolin tanelerinin çok küçük, çubuk gibi ve köşeli yapıda oldukları belirtilmektedir. MK mineralinin tanecik yapısını incelemek amacıyla çekilmiş 1000 ve 5000 ölçekli taramalı elektron mikroskobu Şekil 2.5’de sunulmuştur. MK mineralinin çok ince tane boyutuna sahip olması ve çubuksu tanecik yapısı sebebiyle beton içindeki boşluklu yapıyı ve harcın kıvamını azaltıcı yönde etkisi olmaktadır (Tevrizci 2010).



Şekil 2.5 Metakolin mineralinin SEM görüntüleri (Çelikten 2014).

Metakaolin, kalsiyum silika hidrat oluşturulması amacıyla kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebilir. Bu durum harç ve betonun belirli özelliklerinin gelişmesine katkı sağlayabilir (Vu 2002). Literatürde metakaolinin çimento ile ikame edilmesi sonucu, mekanik özellikleri pozitif etkilediği, kılcal su emmeyi ve permeabiliteyi azalttığı, durabiliteyi arttırdığı, çiçeklenmeyi kontrol etmede etkili olduğu ve özellikle alkali silika reaksiyonu oluşumunu azalttığı belirtilmektedir (Almaz 2010).

Metakaolinin beton üretiminde kullanımına yönelik yapılan çalışmaların büyük kısmı karışım için optimum metakaolin miktarının belirlenmesi amacıyla. Metakaolinin portland çimentosu ile ikame edilmesi ve betona değişik oranlarda eklenen metakaolinin beton özelliklerine etkisi günümüzde de araştırılmaya devam etmektedir. Bu çalışmalara ek olarak, metakaolinin C₃S ile kullanım kombinasyonlarındaki reaktiflik kabiliyeti de deneysel olarak incelenmektedir (Nebioğulları 2010).

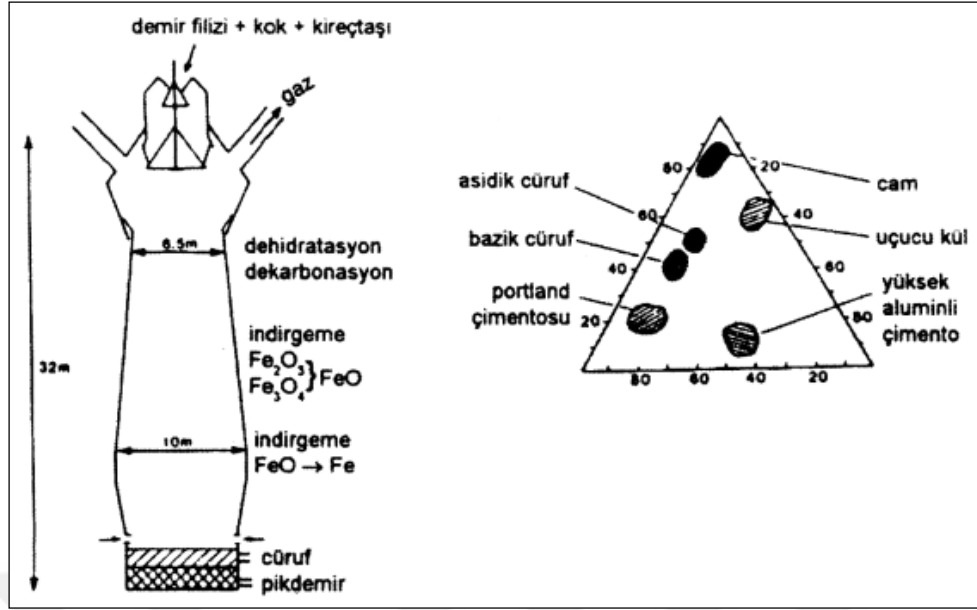
2.5 Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir cevherinin demir metali üretilecek şekilde ergitilmesi

sonucu oluşan bir üründür (Thomas 2014). Aslında, cüruflar metal ve alaşım endüstrilerinde, piro-metalurjik işlemlerin yan ürünleridir. Bileşimleri ve miktarları cürufun oluştuğu sürece ve işlemde kullanılan malzemelere bağlıdır (Tokyay 2016). Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'yi meydana getirirler. YFC'nin oluşum sıcaklığı 1400-1600 °C'dir (Tokyay ve Erdoğan 2009). Fırından çıkarılan cüruf yaklaşık olarak 1400–1600°C sıcaklığa sahip olduğundan, kullanım öncesi soğutulması gerekmektedir. YFC'ye uygulanan farklı soğutma işlemleri sonucu özellikleri değişmektedir. YFC'nin bağlayıcı malzeme olarak kullanılabilmesi için granülasyon ve hava granülasyonu olarak bilinen iki değişik tipte yöntem vardır. YFC'nin amorf yapıya sahip olması için kullanılan bu iki yöntemde de hızlı soğutma uygulanmalıdır. Yavaş soğutma işleminde bağlayıcılık özeliği olmayan kristal yapılı malzeme oluşmaktadır (Bilim 2006).

YFC'nin hidrolik potansiyeli 1862 yılında ilk kez Almanya'da Emil Langen tarafından keşfedilmiştir. 1865 yılında ticari olarak kireç ile aktive olan cüruf üretimi Almanya'da başladı ve 1880 yılında ilk kez Portland çimentosu (PÇ) ile birlikte kullanıldı. O zamandan beri Fransa, Hollanda, Almanya gibi birçok Avrupa ülkesinde kullanılmaktadır (Newman and Choo 2003). 1889 yılında Paris'te metro inşaatında YFC kullanımı gerçekleşmiştir. Beton katkı maddesi olarak kullanımı 1950'lerden sonra başlamıştır (Canbaz 2007). Bu uygulamaya başlanmasında Güney Afrikalı N. Stutterheim tarafından 1948-1952 yıllarında yapılan araştırmalarda elde edilen olumlu sonuçların büyük rolü olmuştur (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

YFC'nin kimyasal kompozisyonu bir üçlü diagramda ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) diğer bazı malzemelerle birlikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir (Şekil 2.6). YFC yavaş soğutulduğu takdirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir (Tokyay ve Erdoğan 2009).



Şekil 2.6 Yüksek fırın şeması (Tokyay ve Erdoğan 2009).

Yüksek fırın cürufunu kimyasal bileşimi çimento klinkeri ile benzer yapıdadır (Shetty 2005). Yapılan demirin ve kullanılan cevherin türüne göre kimyasal yapısı değişiklik gösterir (Shi *et al.* 2006). Bu değişiklik demir cevherinin yapısından değil, aynı zamanda kok kömüründen, ekonomiklik yaratmak için farklı demir cevherleri ile yapılan karışımlardan ve yüksek fırındaki sıcaklık rejiminden kaynaklanmaktadır (Bilgen vd. 2010).

Granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kimyasal yapısıdır. Fakat birçok araştırma konusu olmasına rağmen puzolanik özellikler ile kimyasal yapı arasında kesin ve net bir korelasyon elde etmek mümkün olmamıştır. Genel olarak alkalinitesi yüksek olan granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılığının da iyi olduğunu kabul edilmektedir. Granüle yüksek fırın cüruflarının CaO/SiO₂ oranının belli bir sınır değere kadar artmasıyla puzolanik özelliği de artmaktadır. Fakat CaO miktarının çok yüksek olduğunda puzolanik özellikte azalma görülür. Sabit bir CaO/SiO₂ oranı için Al₂O₃ miktarı artışı ise cürufun puzolanik aktivitesini artırmaktadır. Cüruf içinde %10 oranında MgO içermesinin dayanımda olumsuz bir etkisi olamamaktadır. Fakat, %10'dan daha fazla MgO miktarları zararlıdır (Luga 2015). Granüle YFC çimentoda hidrasyon hızını artırmak için öğütölüp çimentoya karıştırılır. Hidrolik bağlayıcılığı, olabildiğince çok ince öğütölmesine bağlıdır ve portland çimentosunun inceliğinden daha düşük incelik değerine gelene

kadar öğütülmelidir (Sürül 2015). Çimentonun hidratasyonu ile birlikte iç yapıda çimento hidratasyon ürünleri olan kalsiyum silika hidrat (CSH) ve kalsiyum hidroksit (CH) oluşmaktadır. Kalsiyum silika hidratlar bağlayıcı karakter sergilerken kalsiyum hidroksitler daha zayıf ve suda çözünme eğilimindedirler. Yüksek fırın cürufu kalsiyum hidroksitle reaksiyona girme kabiliyetine sahiptir. Yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi, amorf yapısı bu reaksiyonu etkileyebilecek en önemli özellikleridir. Yüksek fırın cürufunun öğütülmesi reaksiyona girme kapasitesini etkilemektedir. Ayrıca cürufun hızlı ve yavaş soğutulması da kristal yapısında değişikliğe sebep olmaktadır. Yüksek fırın cürufu yapısındaki yüksek CaO muhtevası sebebiyle çimento gibi bağlayıcılık özelliği de gösterebilmektedir (Boğa 2010).

Yüksek fırın cürufunun terleme ve hidratasyon hızını azaltıcı yönde etki ettiği, taze betonun işlenebilmesini arttırdığı, çimento hamurunun prizini uzattığı, sertleşmiş betonda ise durabilite değerlerini kuvvetlendirdiği bilinmektedir. Literatür bilgilerinde özellikle soğuk hava koşullarında betonun prizinin uzamasına, ilk günlerdeki dayanım kazanma hızının yavaşlamasına neden olduğu belirtilmiştir (Erdoğan 2015). Yüksek fırın cürufunun beton içerisinde kullanılmasıyla, çimento pastasında ince ve süreksiz boşlukların ortaya çıktığı, agrega- çimento arayüzeyindeki boşluklarda azalma oluştuğu, betonun durabilite özelliğinin artış sağladığı gözlenmiştir (Yılmaz 2014, Emekli 2015). Ayrıca, YFC ile çimento ikame edilmesi ile etkinlik katsayısı gündeme gelmektedir. Bağlayıcı malzemenin etkinlik katsayısı (k) portland çimentosunun eşdeğeri anlamına gelir. Diğer bir deyişle k değerinin 1'e eşit olması çimentonun 1:1 oranda cüruf ile yer değiştirmesi durumunda da betonun aynı özelliklere sahip olduğunu, 1'den küçük olması ise betonun aynı özelliklere sahip olması için çıkan çimento miktarından daha fazla YFC girmesi gerektiğini gösterir (Emekli 2015).

Granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerden birisi kimyasal yapısıdır. Ancak, yapılan birçok araştırmaya rağmen puzolanik özellikler ile kimyasal yapı arasında kesin ve basit kurallar elde edilememiştir. Genel olarak alkalinitesi yüksek olan granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılığının da iyi olduğu kabul edilmektedir (Baradan vd. 2015).

Granüle yüksek fırın cüruflarının puzolanik aktiviteleri belli limitteki değere kadar, CaO/SiO₂ oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Ancak, CaO miktarının çok yüksek olması halinde puzolanik aktivitede azalış gözlenir. Sabit bir CaO/SiO₂ değeri için Al₂O₃ miktarı artışı ise yüksek fırın cürufunun puzolanik aktivitesini arttırmaktadır. Ancak daha yüksek MgO miktarı zararlıdır (Baradan vd. 2015).

2.6 Gazbeton İle İlgili Yapılmış Önceki Çalışmalar

Demir vd. (2011), yüksek SiO₂ içerikli endüstriyel atıkların gazbeton blok üretiminde kullanım parametrelerinin belirlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada, gazbetonun ana hammaddesi yerine uçucu kül ve silis dumanı kullanarak deney örnekleri üretmişler ve örnekler üzerinde fiziksel, mekanik, reolojik ve mikroyapı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kapsamında yaptıkları deneysel araştırmalar sonucu uçucu kül kullanılarak ekonomik şartlarda gazbeton üretimi yapılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Özel (2013), gazbeton ana hammaddesi kuvars kumu yerine uçucu kül kullanmıştır. Uçucu külü belirli oranlarda kuvars kumu yerine ikame ederek gazbeton örnekleri üretmiştir. Ürettiği örnekleri 60 °C sıcaklıkta 4 saat buhar küründe beklettikten sonra 180 °C sıcaklıkta ve 11 bar buhar basınçta 6,5 saat otoklav kürüne tabi tutmuştur. Uçucu kül ikame oranının ısı iletkenlik katsayısı bakımından optimum oranının %10 olduğunu belirlemiştir.

Başpınar vd. (2014), uçucu kül ve silis dumanının gazbeton üretiminde kullanım potansiyelini araştırmışlardır. Optimum uçucu kül/çimento oranını belirledikleri karışımlara silis dumanı ilavesi gerçekleştirerek deney örnekleri üretmişlerdir. Deney örneklerinin mikroyapılarını incelediklerinde Tobermorit ve Xonotlit fazlarının geliştiklerini gözlemlemişler ve silis dumanı ilavesinin ürün içindeki etrengit fazının önlenmesi için yararlı olduğunu ortaya koymuşlardır.

Güçlüer vd. (2015) yaptıkları çalışmada gazbeton üretiminde uçucu kül ve silis dumanı kullanmışlardır. Üretilen örnekleri 156 °C – 177 °C sıcaklık ve 4 - 8 bar buhar basıncı altında 8 saat süreyle küre tabi tuttuktan fiziksel, mekanik ve mikroyapı araştırmaları

yapmışlardır. Ürettikleri örneklerin birim ağırlıklarının $0,6 - 0,7 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımlarının $2,5 - 4,4 \text{ MPa}$ aralığında olduğunu belirlemişlerdir.

Güçlüer (2011), uçucu kül ve silis dumanının gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Silis dumanı kullanımı ile birim hacim ağırlık değerlerinde düşüş, basınç dayanımı değerlerinde artış olduğunu belirtmektedir. Basınç dayanımı anlamında silis dumanının optimum ikame oranının %3 olduğunu belirlemiştir.

Cerny ve Drochytka (2014), Çek Cumhuriyeti termik santrallerinden elde ettikleri uçucu külleri kullanarak gazbeton örnekleri üretmişlerdir. Uçucu külden üretilen gazbeton örneklerine uygulanan otoklav kürü süresinin tobermorit gelişimini etkilediğini ve buna bağlı olarak basınç dayanımı değerlerinin de etkilendiğini belirlemişlerdir.

Kozak (2010) gazbeton ana hammaddesi olarak Seyitömer termik santralinden elde edilen uçucu külü kullanarak gazbeton örnekleri üretmiştir. Gazbeton örneklerine 8 saat süreyle $1,15 \text{ bar}$ buhar basıncı altında kür işlemi uygulamıştır. Fiziksel ve mekanik deneylerle birlikte mikroyapı çalışmaları yürütmüştür. Uygulanan düşük otoklav basıncı nedeniyle örneklerin mikroyapılarında mukavemete katkı sağlayan CSH fazlarının yeterli oranda gelişmediğini ortaya koymuştur.

Güçlüer vd. (2014), gazbeton üretiminde silis kumu yerine uçucu kül ve bağlayıcı olarak kullanılan çimento yerine de belirli oranlarda silis dumanı ikame ederek gazbeton örnekleri üretmişlerdir. Örnekler 8 saat süresi boyunca serbest buhar kürü uygulaması gerçekleştirdikten sonra fiziksel ve mekanik deneyler yürütmüşlerdir. Elde ettikleri deney sonuçlarının ticari gazbetonun fiziksel ve mekanik özellikleriyle benzer olduğunu bulmuşlardır.

Walczak vd. (2015), 350 kg m^{-3} yoğunluktaki uçucu külden ürettikleri gazbeton örneklerin kuvars kumu ile ürettikleri gazbeton örneklerle basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı özelliklerini karşılaştırılmışlardır. Sonuç olarak uçucu külden ürettikleri örneklerin kum ile üretilen örneklerden daha yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip olduklarını bulmuşlardır.

Çelik (2005) çalışmasında uçucu külün gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Gazbeton üretiminde kullanılan çimentoyu; %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında eksilterek, yerine uçucu kül ikame ederek katkılı ve katkısız gazbeton numuneleri üretmiştir. Ürettiği bu numuneler üzerinde SEM analizleri, fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak uçucu külün, %15 uçucu kül katkı oranına kadar G2 sınıfı gazbeton üretiminde, %30 uçucu kül katkı oranına kadar da G1 sınıfı gazbeton üretiminde kullanılabileceğini bulmuştur.

Aker (2011) gazbeton üretiminde perlit kullanılabilirliğini araştırmıştır. Ürettiği deneysel örnekler üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler ile mikroyapı çalışmaları gerçekleştirmiştir. Deney örneklerinin mekanik özelliklerinin ticari gazbeton özellikleri ile uyum sağladığını belirlemiştir.

Rozycka ve Pichor (2016) atık perlit katkısının gazbeton özellikleri üzerine etkisini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada, atık perlit katkısı kuvars kumu ile %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirmişlerdir. %10 oranında perlit katkının ısı iletkenlik katsayısını ve basınç dayanımını düşürdüğünü bulmuşlardır.

Wongkeo ve Chaipanich (2010) atık taban külü ve silis dumanından yapılmış otoklav ve hava kürüne tabi tutulmuş düşük yoğunluklu gazbetonların basınç dayanımı, mikroyapı ve termal iletkenliklerini araştırmışlardır. Sonuçlara göre atık taban külünden üretilen numunelerde 6 saatlik otoklav kürüne tabi tutulanlar ile 28 gün havada kür edilen numunelerin basınç dayanımlarının benzer çıktığını ancak karışıma silis dumanı katıldığı zaman basınç dayanımında daha yüksek sonuçlar elde edildiğini belirlemişlerdir.

Kurama vd. (2009) Tunçbilek Termal Güç Santralinden elde edilen atık taban külünün gazbeton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Değişik oranlarda katılan taban küllü örneklerin üretiminden sonra kimyasal, mekanik, fiziksel ve mikroyapı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda tüm gazbeton örneklerinde birim ağırlıkların düştüğünü görmüşler ancak %25 ve %50 oranlarında yer değiştirilen serilerde dayanımda faydalı sonuçlar almışlardır. Isı iletkenlik değerlerinin ise atık

taban külünün yükseltilmesine paralel olarak azaldığını belirlemişlerdir.

Çalışkan (2015) kuvars kumu yerine diyatomit kullanarak gazbeton örnekleri üretmiştir. Üretim prosesinde farklı buhar basınçlarında kür işlemi uygulayarak, kimyasal ve diğer katkılar ile fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesini hedeflemiştir. Üretilen gazbeton örneklerin birim ağırlıklarına göre ($375-285 \text{ kg/m}^3$) ısı iletkenlik katsayılarının $0,07-0,09 \text{ W/mK}$ arasında değiştiğini ve hidrofovik polimer katkı ile dispersan katkının gözenek yapısının gelişiminde etkili olduğunu bulmuştur.

Karakurt vd. (2010) doğal zeoliti gazbetonda agrega ve gözenek oluşturuucu malzeme olarak kullanmışlardır. Buldukları sonuçlarda özellikle kaba boyutlardaki doğal zeolitin kullanımının gazbetonun fiziksel ve mekaniksel özelliklerini faydalı biçimde etkilediğini belirtmektedirler. Optimum yer değiştirme miktarını %50 olarak bulmuş ve bu orandaki gazbeton numunelerinin basınç dayanımı değerlerini 3.25 MPa , birim ağırlıklarını 0.553 kg/dm^3 ve ısı iletkenliği 0.1913 W/mK olarak ölçmüşlerdir. SEM analizlerini %50 oranındaki zeolit katkılı gazbeton örnekleri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yoğun C-S-H yapılarını %50 miktarında yer değiştirilen örnekler üzerinde bulmuşlardır. Sonuç olarak kalsine zeolitin gazbeton üretiminde hem agrega hem de gözenek oluşturuucu olarak kullanılabileceğini ve basınç dayanımı 4.6 MPa ve birim ağırlığı 0.930 kg/dm^3 olan gazbetonların alüminyum tozu olmaksızın üretilabileceğini belirlemişlerdir.

Albayrak vd. (2007) zeolitin gazbetonun özellikleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Zeoliti gazbeton karışımlarında kuvars ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Zeolit katkılı gazbeton örneklerin bulk yoğunluklarını $270-500 \text{ kg/m}^3$ olacak şekilde hazırlamışlardır. Örnekleri X ışınları kırınımı, X ışınları yansıması ve termal analiz kullanarak analiz etmişlerdir. Bulk yoğunluk, basınç dayanımı ve termal iletkenlik parametrelerini araştırmışlardır. Araştırmanın sonuçlarına göre, ticari gazbeton esas olarak tobermorit, kuvars ve anhidrit fazlarından oluştuğunu, fakat zeolit katkılı örneklerde, tobermorit ve kuvarsın yanında reaktif olmayan anhidrit ve klinoptilolit fazlarını bulmuşlardır. Zeolit katkılı XRD örnekleri, $700-1000^\circ\text{C}$ 'deki işlemlerinden sonra wollastonite, gehlenite ve orthoclase fazları gözlenmiştir. Zeolit

katkılı gazbeton örneklerinin termal iletkenliklerinde düşüş olduğunu belirlemişlerdir (0.08-0.12 kcal/m h °C). Basınç dayanım değerlerinin 1.22-3.34 N/mm² arasında olduğunu bulmuşlardır.

Liu vd. (2017), alüminyum atıklarından elde ettikleri toz malzemeyi gazbeton üretiminde gözenek oluşturuca ajan olarak kullanımını araştırmışlardır. Sonuç olarak 15.6 gr atık alüminyum tozunun, 1 gr alüminyum tozunun oluşturduğu hacim genişlemesini yarattığını bulmuşlardır.

Gupta ve Garg (2014), gazbeton üretiminde gözenek oluşturuca olarak alüminyum tozu yerine, hidrojen peroksit, oleik asit ve zeytin yağı kullanarak gazbeton örnekleri üretmişlerdir. Kullandıkları bu katkıların gazbetonun kabarmasında oldukça etkili olduklarını ancak dayanımda düşüşe sebep olduklarını bulmuşlardır.

Mostafa (2005) Kireç ve kumu gazbetonda hava ile soğutulmuş cüruf ile yer değiştirmiştir. Basınç dayanımını örneklere farklı zaman aralıklarında 8 barlık basınç uygulanarak; (2,6,12 ve 24 saat aralığı) ölçmüştür. Hidratasyon reaksiyonunu sönmemiş kireç ile su arasında takip etmiş hidratasyon ürünleri XRD ve SEM/EDX analizlerini kullanarak araştırmıştır. %50 oranında cürufun kum ve kireç ile yer değiştirmesinin basınç dayanımını arttırdığını optimum dayanımın; %50 cüruf ile düşük kireç (%10 CaO) ve %30 cüruf ile yüksek kireç (%25 CaO) karışımlarında elde edildiğini belirlemiştir.

Ma vd. (2016), demir atıklarının gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. 1.4 MPa basınçlı buhar kürü altında sertleştirdikleri numunelerde 2.5 MPa basınç dayanımı ve mikroyapıda CSH fazı yanında tobermorit plakaları gözlediklerini ortaya koymuşlardır.

Wang vd. (2016) kömür ve demir cüruf atıklarını gazbeton katkısı olarak kullanmışlardır. Ürettikleri deney örneklerinin birim ağırlıklarının 603 kg m⁻³ seviyelerinde ve basınç dayanımlarının 3.68 MPa değerinde olduğunu bulmuşlardır.

Huang vd. (2012), bakır atıkları ve yüksek fırın cürufu kullanarak gabzeton örnekler

üretmişlerdir. Ürettikleri örneklerin mikroyapılarını incelediklerinde tobermorite 11 A, anhidrit, auigite, kuvarz, kalsit ve dolomit minerallarının bulunduğunu belirtmektedirler. Örneklerin yoğunluklarının ve dayanımlarının ise $610,2 \text{ kg m}^{-3}$ ve 4.0 MPa seviyelerinde olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yuan vd. (2017), sodyum karbonat ile aktive ettikleri cürufu çimento ile tamamen yer değiştirerek gazbeton örnekleri üretmişlerdir. Çimento esaslı ürettikleri gazbetonlar ve aktive cüruf ile ürettikleri gazbeton örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Sodyum karbonat ile aktive ettikleri gazbetonların basınç dayanımı değerlerinin referans numunelere göre %25 daha düşük, termal iletkenliklerinin %13 daha yüksek, rötre değerlerinin %5.5 daha düşük olduğunu bulmuşlardır.

Pehlivanlı vd. (2016) farklı tipte lif katkı kullanarak gazbeton örnekler üretmişlerdir. Kullandıkları lif katkısı agreganın belirli bir ağırlığı ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Kullandıkları lif katkısının, gazbeton örneklerin termal özelliklerini olumlu etkilediğini, özellikle karbon lif katkıların basınç dayanımı ve eğilme dayanımını geliştirdiğini bulmuşlardır.

Laukaitis vd. (2009), çeşitli lif katkılarının gazbetonun özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Lif katkıların gazbeton harcının plastik dayanımını arttırdığını, akışkanlığını ve kabarmasını etkilediğini belirtmektedirler. Lif katkısının gazbetonun basınç ve eğilme dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Ramamurthy ve Narayanan (2000), otoklav kürü yapılmış ve yapılmamış gazbeton örneklerinin kuruma büzülmesi üzerine kompozisyonların etkisini araştırmışlardır. Çimento-kireç oranının ve uçucu kül içeriğinin artırılması ile kuruma büzülmesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Otoklav kürü sayesinde kuruma büzülmesinde önemli oranda azalma elde etmişlerdir. Hidratasyon ürünlerinin fiziksel yapılarının kuruma büzülmesine büyük oranda etki ettiğini belirlemişlerdir.

Lyazat (2014), otoklav kullanılarak üretilen ve otoklav kullanılmadan üretilen gazbeton duvar malzemelerin kullanılabilirliğini karşılaştırmalı olarak araştırmıştır. Otoklavda

kür uygulaması olmadan üretilen gazbetonların küçük çaplı duvar işlerinde ve düşük nüfus yoğunluklu yapılarda kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Shabbar vd. (2016) gazbetona farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde kür uygulanmasını araştırmışlardır. Ürettikleri gazbeton örnekleri 100 – 140 °C sıcaklık ve 0 – 2,6 bar basınç aralığında farklı kür işlemine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerlerinin 120 °C'ye kadar artış gösterdiğini sonrasında ise düştüğünü bulmuşlardır.

Tanaçan vd. (2009), yüksek sıcaklıkların ve çeşitli soğuma rejimlerinin gazbeton üzerine etkisini araştırmışlardır. Hava soğutmalı malzemeleri oda sıcaklıklarında ve yangın sonrası sıcaklıklarda test etmişlerdir. Su ile söndürmenin etkisini söndürme sonrasındaki ıslak durumda ve oda sıcaklığındaki kuru koşullarda gerçekleştirdikleri testlerle belirlemişlerdir. Sonuç olarak söndürme etkisinin göz ardı edilmesi durumunda yaklaşık 700-800 °C sıcaklığın gazbetonun dayanımı üzerine bir etkisinin olmadığını belirtmektedirler. Ancak 800 °C'den sonraki sıcaklıklar için daha fazla yangın güvenliğinin alınmasını belirlemişlerdir.

Kus ve Carlsson (2003) gazbetonun dayanıklılığını ve uzun süreli performansının daha iyi anlayabilmek için, doğal ve suni şekilde havalandırılan ve bu uygulamaya tabi tutulmayan gazbeton numunelerinin mikroyapılarının değişimini özellikle de kimyasal etkilerle oluşan değişimleri araştırmışlardır. Doğal bir şekilde havalandırılan numuneleri 130x130x150 mm ebatlarında üretmişler ve 6, 18, 36 ay süre ile İsveç'in doğal iklim şartlarına maruz bırakmışlardır. Yapay olarak havalandırılan numuneleri 65x150x90 mm ebatlarında üretmişler ve ışık ile su spreyine maruz bırakmışlardır. Yapay olarak havalandırdıkları örneklerle 102 dakika ışık ve 18 dakika su spreyi uygulamışlar ve ölçümleri 500, 1000, 1500 ve 2500. saatlerde almışlardır. Sonuç olarak hem doğal hem de yapay olarak havalandırılmış örneklerin mineralojik değişiklikler bakımından benzer özellikler gösterdiklerini, suni havalandırma yaptıkları numunelerde daha fazla fiziksel bozunma gözlemlenmiştir.

Savaş (2013), gazbeton üretiminde sepiyolit kullanımını araştırmıştır. Kullandığı

sepiyoliti belirli oranlarda kuvars kumu ile ikame etmiştir. Ürettiği örnekleri 60 °C sıcaklıkta 4 saat buhar küründe beklettikten sonra 180 °C sıcaklıkta ve 11 bar buhar basınçta 6,5 saat otoklav kürüne tabi tutmuştur. Sonuç olarak gazbeton üretiminde kuvars kumu yerine sepiyolit ikamesinde optimum oranın %10 olduğunu belirlemiştir.

Xia vd. (2013) fırın taban uçucu külü kullanarak otoklavda sertleştirilmemiş gazbeton örnekler üretmişlerdir. Yapmış oldukları mikroyapı incelemeleri sonucunda, örneklerin C-S-H yapısının otoklav ile üretilen örneklerin mikroyapısından farklı olduğunu bulmuştur.

Kapala ve Dachowski (2016) kalsedonun gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Birim ağırlık, basınç dayanımı ve kapiler su emme deneyleri gerçekleştirdikleri numuneler üzerinde kullandıkları katkının gazbeton özelliklerini olumlu etkilediğini bulmuşlardır.

Walczak vd. (2015), cam atıklarının gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Basınç dayanımı, yoğunluk, eğilme dayanımı ve mikroyapı araştırmaları için farklı yapıda cam atıkları kullanmışlardır. Kullandıkları cam atıkları kum ile yer değiştirerek gazbeton bileşimine katmışlar ve sonuç olarak kullandıkları katkıların olumlu sonuçlar yarattığını bulmuşlardır.

Kunchariyakun vd. (2015), pirinç kabuğu külünü gazbeton üretiminde ince agrega olarak kullanmışlardır. Pirinç kabuğu külü ile kuvarz kumunun yer değiştirilmesi sonucunda basınç dayanımında ve birim ağırlık değerlerinde düşüş gözlemlemişlerdir.

Bisceglie vd. (2014), yaptıkları çalışmada gazbeton atıklarını yeşil çatı üretiminde kullanmışlardır. Pomza katkılı ve atık gazbeton katkılı ürettikleri çatı elemanı malzemelerinde birbirleri arasında iyi şekilde uyum sağladıklarını belirtmektedirler.

Pehlivanlı (2009) gazbetonun ısı iletkenlik değerinin nem içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini deneysel olarak araştırmıştır. G2/04 sınıfı gazbeton numunelerinin, 0.0% ile 48% arasında değişen beş farklı kütle nem içeriği için 0 °C ile 45 °C

arasındaki sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayıların değişimini deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak ısı iletkenliğin kütsel nem içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak arttığını ortaya koymuşlardır.

Mousa ve Uddin (2009), hibrid fiber-takviyeli polimer (FRP) gazbeton panellerin yapısal davranışlarını araştırmışlardır. FRP laminatlarının daha yüksek sertlikte gazbeton panelleri üretiminde kullanılabileceğini söylemektedirler. Bunu başarmak için panel üretimi gerçekleştirmiş ve testlere tabi tutmuşlardır. Deney sonuçlarına göre FRP laminatlarının gazbeton panellerinin hem dayanımını hem de düktilitesini önemli derecede etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Karaaslan (2009), gazbeton malzemesinin, yürürlükteki Türk standartlarına göre ısı aktarım özelliklerinin ölçüm prosedürünü araştırmıştır. Çalışmasında belirli yoğunluktaki gazbeton numunesinden çıkarılacak ısı iletkenlik deneyinin gerçekleştirileceği en küçük deney parçası kalınlığını standart yönergelerine uygun olarak araştırmıştır.

Aksoy (2008) Elazığ ilindeki (TS 825-3.Bölge) sandviç ve gazbeton duvar uygulamalarında, ortalama ısı geçirgenlik katsayısı (U_{ort}) ve ısı kaybı değerlerini (Q) araştırmıştır. Mevcut durum ve yönetmelikteki uygulamaların ortalama U-değerleri ve ısı kaybını hesaplamış ve karşılaştırılmalarını yapmıştır. Mevcut durumu, gazbeton duvar uygulamalarında $U_{ort}=0.99$ ve $1.21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve sandviç duvar uygulamalarında ise $U_{ort}=0.94-1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplamıştır. 3. bölge için istenen $U=0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ göre detaylandırılan, duvar uygulamalarında ısı kayıplarının yaklaşık % 35-55 azaldığını bulmuştur.

Önel vd. (2007) gazbetonun döküm anında oluşan kabarmanın, donatı aderansı ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Ø6'lık düz donatı gazbeton döşeme paneli kullanmışlardır. Gazbetonun kabarma yönüne göre alt, orta ve üst kısımlardan numuneler alarak aderans ve basınç testlerine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak gazbetonun alt kısmına göre, orta ve üst kısımlarının daha düşük aderans ve basınç dayanımı gösterdiğini bulmuşlardır.

Andolsun (2006), Türkiye’de üretilmekte olan gazbeton malzemesinin, komşu sıvalarının ve gazbeton yapıştırıcısının temel, mekanik, fiziksel, bileşim ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmasında; biri dolgu, G2, diğeri taşıyıcı, G4, iki çeşit gazbeton bloğu, gazbeton yapıştırıcısı ve birbiri ardına uygulanan çimento esaslı dış sıvaları laboratuvar analizleriyle incelemiştir. Bulguları gazbetonun malzeme özellikleri açısından değerlendirmiş; gazbeton ve bütünleyici duvar elemanlarının birbirleriyle ve onarım amaçlı kullanımlarında, Anadolu’daki tarihi ahşap karkas yapılarla uyumluluk açısından yorumlamıştır. Sonuç olarak gazbeton yapı malzemesinin tarihi yapıların onarımında dolgu malzemesi olarak kullanımının yalnızca özgün dolgu malzemenin kaybedildiği durumlarda kullanılabileceğini belirlemiştir.

Ünverdi (2006) gazbeton kırıklarının geri dönüşümünün sağlanabilmesi için 400 dozlu silindir ve küp beton numuneleri üretmiş numuneleri yüksek sıcaklık fırınlarında bekletmiştir. Küp ve silindir numunelerde, %0, %25, %50 ve %75 oranında gazbeton kırığını kırmataş 2 yerine kullanarak seriler üretmiş ve serileri oda sıcaklığı, 300 °C, 600 °C ve 900 °C’lik sıcaklıklara tabi tutarak, hasarlı ve hasarsız deneyler yapmış ve deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak gazbeton atığının betonda agrega olarak belirli oranda kullanılmasının, yüksek sıcaklığın beton üzerindeki olumsuz etkilerini azalttığını bulmuştur.

Laukaitis ve Fiks (2006), çalışmalarında gazbetonun akustik kalitesini araştırmışlardır. Gazbetonun akustik kalitesinin geçirgenlik ve porozitesine göre değiştiğini belirtmektedirler. Akustik girişimölçer ile ölçümler yapmışlardır. Çeşitli gazbeton tipleri ile yaptıkları deneylere göre, hava geçirgenliğinin fonksiyonu şeklinde ses absorpsiyon katsayısı regresyon denklemlerini bulmuşlardır.

Matsushita vd. (2004) karbonatlaşma derecesi ile rötre arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu amaçla laboratuvar koşullarında %3 ve %0.3’lük CO₂ miktarlarıyla karbonatlaştırılmış örnekler üretmişlerdir. Karbonatlaşma derecesi %20’den az olan oranlarda rötre gözlemlemişler %20-%50 arasındaki oranlarda rötre gözlemlemişler ve bu değerin yaklaşık %0.1 olduğunu belirtmektedirler. Karbonatlaşma derecesini %50 ile %60 arsında tuttuklarında rötre değerini bu sefer yaklaşık %0.25 olarak

gözlemlemişlerdir. %25 ‘den daha az oranlarda karbonatlaşma olmamasının sebebini bu derecedeki silikat anyon yapılarının iki kez korunmasına ve iç yüzeydeki Ca iyonlarının yerini protonların alması olarak açıklamaktadırlar.

Grutzeck vd. (2004), uçucu kül tabanlı gazbeton formülasyonunu sodyum hidroksit (NaOH) ile destekleyerek daha sert ve darbelere daha az eğilim gösterecek gazbeton örnekleri üretmeyi amaçlamışlardır. Otoklav kürü süresince tobermorit matriksi içerisindeki zeolit kristal yapısının gelişimini gerçekleştirmek için yeterli alkali girişini sağlamışlardır. Karışımların zaman ve sıcaklıkla olan ilişkisini incelemişlerdir.



3. MATERYAL ve METOT

3.1 Materyal

Çalışmada, Manisa-Gördes bölgesinden temin edilen zeolit, AVS mineral tarafından temin edilen metakaolin ve OYAK çimento tarafından temin edilen öğütülmüş YFC kullanılmıştır (Resim 3.1). Alçı ve sönmemiş kireç Antalya YTONG fabrikasından temin edilmiştir. Bağlayıcı olarak TS EN 197-1 ile uyumlu CEM I 42.5 R tipte Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento ve minerallere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çimentoya ait fiziksel özellikler Çizelge 3.2, minerallere ait fiziksel özellikler ise Çizelge 3.3’te verilmiştir. Çalışmada ayrıca TS EN 934-2 ve ASTM C 494 ile uyumlu naftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Katkıya ait teknik özellikler Çizelge 3.4’te verilmiştir.



Resim 3.1 Kullanılan hammaddeler.

Çizelge 3.1 Çimento ve minerallere ait kimyasal kompozisyon.

Bileşen (%)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S+A+F
Çimento	19,2	62,8	3,88	4,25	3,42	0,34	2,1	-
Zeolit	71,9	2,0	13,2	1,4	1,1	3,5	0,3	86,50
Metakaolin	54	0,01	42	0,35	0,06	0,2	0,13	96,35
YFC	40,1	39,6	12,8	0,9	4,2	1,2	0,05	92,50

Çizelge 3.1 incelendiğinde zeolit ve metakanoline ait kimyasal bileşimlerde S+A+F oranı, zeolit için %86,50 metakaolin için ise 96,35 olarak bulunmuş olup TS 450’de verilen %70 oranı geçilmiştir. Çimento ve kullanılan diğer hammaddeler içinde gazbeton üretimi için olumsuz etki yaratabilecek zararlı bileşene rastlanmamıştır.

Çizelge 3.2 Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellikler		Sonuçlar
Özgül Ağırlık (g/cm^3)		3.09
Priz Süresi	Priz başı (dk)	125
	Priz sonu (dk)	190
İncelik	Özgül Yüzey (cm^2/g)	3074

Çimentonun fiziksel özellikleri incelendiğinde özgül yüzey alanı Blaine incelik deneyi ile TS EN 196-6’ya uygun olarak gerçekleştirilmiş ve özgül yüzey değeri $3074 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak bulunmuştur. TS EN 196-3’e uygun olarak çimento piknometresi ile gerçekleştirilen özgül ağırlık deneyi sonucunda da kullanılan çimentonun yoğunluğu $3,09 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur.

Gazbeton üretiminde kullanılacak ana hammaddelere ilişkin özgül ağırlık deneyleri TS 3526’ya uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek yoğunluk değeri $2,80 \text{ g/cm}^3$ ile YFC’ye ait olarak bulunmuştur. Zeolitin yoğunluk değeri $2,19 \text{ g/cm}^3$ metakaolinin yoğunluk değeri ise $2,03 \text{ g/cm}^3$ olarak bulunmuştur. Blaine ile ölçülen özgül yüzey alanı değerleri incelendiğinde, en yüksek özgül yüzey alanı değeri $12882 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak metakaolin hammaddesinde ölçülmüştür. Zeolitin özgül yüzey alanı değeri $2922 \text{ cm}^2/\text{g}$, YFC’nin özgül yüzey alanı değeri $2695 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 3.3 Kullanılan malzemelere ait fiziksel özellikler.

Fiziksel Özellikler	Özgül Ağırlık (g/cm^3)	Özgül Yüzey (cm^2/g)
Zeolit	2,19	2922
Metakaolin	2,03	12882
YFC	2,80	2695
Alçı	2,22	3104
Sönmemiş Kireç	2,63	4232

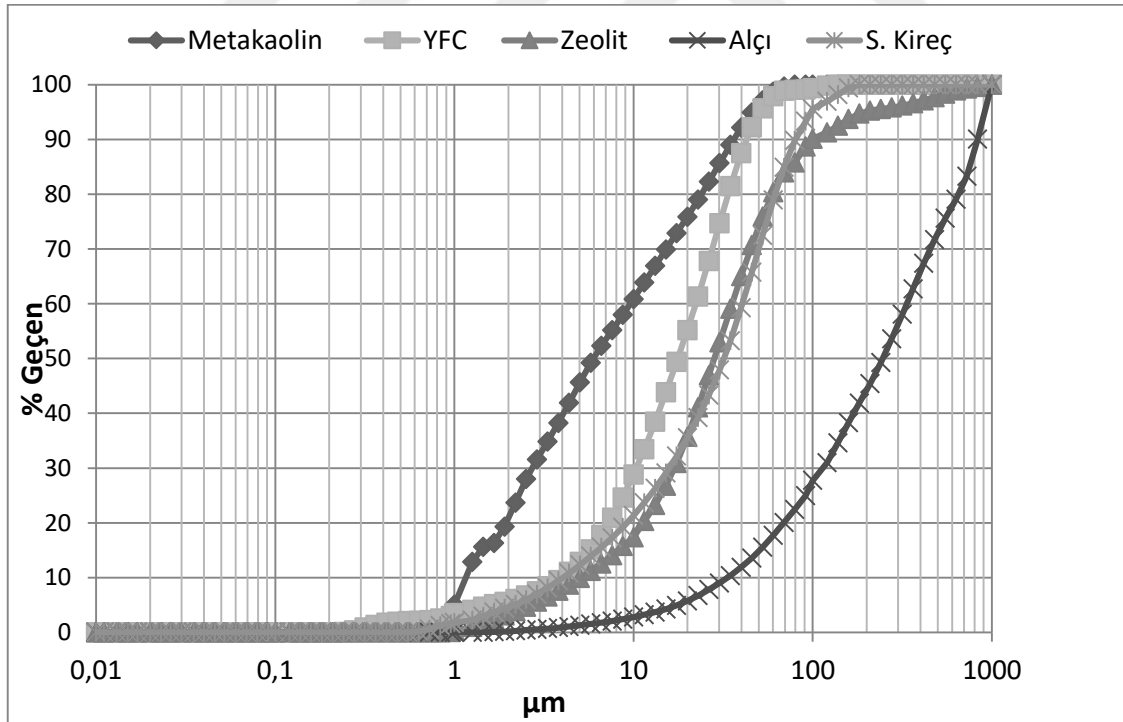
Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı naftalin sülfonat esaslı olup gazbeton üretimi için

uygun niteliktedir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4 Kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıya ait teknik özellikler.

Malzemenin Yapısı	Naftalin Sülfonat esası
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,17 kg/lt
Klor İçeriği	<0,1
Alkali İçeriği	<5

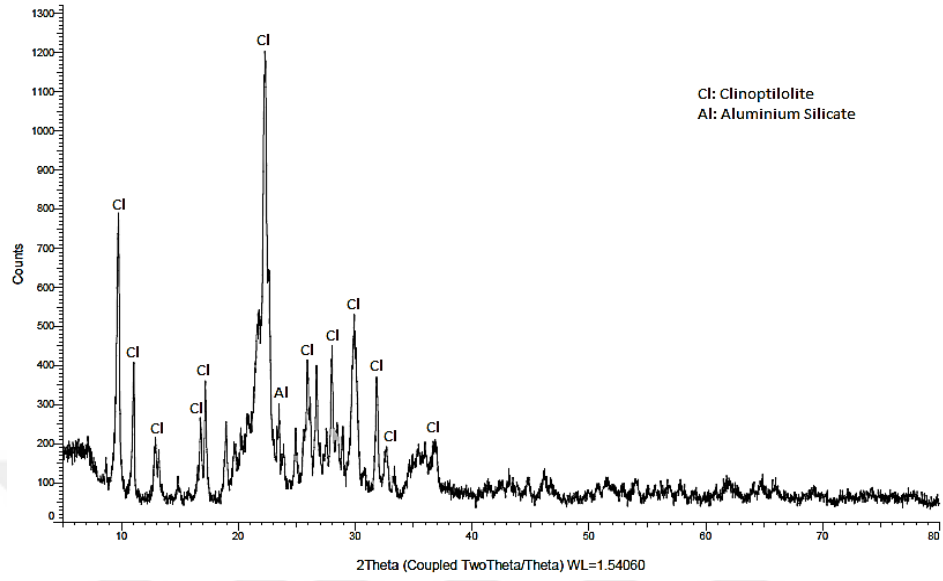
Zeolit, metakaolin ve YFC'ye ait lazer tane boyut dağılım grafiği Şekil 3.1'de verilmiştir. Zeolitin dane çapı dağılımı $d_{10}=5,054 \mu\text{m}$, $d_{50}=28,240 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=103,200 \mu\text{m}$ olarak, metakaolinin dane çapı dağılımı $d_{10}=1,188 \mu\text{m}$, $d_{50}=5,957 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=36,175 \mu\text{m}$ olarak ve YFC'nin dane çapı dağılımı ise $d_{10}=3,985 \mu\text{m}$, $d_{50}=17,635 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=42,623 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Alçı ve sönmemiş kirece ait lazer tane boyut dağılım grafiği Şekil 3.1'de incelendiğinde alçının dane çapı dağılımı $d_{10}=33,449 \mu\text{m}$, $d_{50}=245,791 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=831,355 \mu\text{m}$ olarak, sönmemiş kirecin dane çapı dağılımı ise $d_{10}=4,043 \mu\text{m}$, $d_{50}=31,961 \mu\text{m}$ ve $d_{90}=79,956 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Hammaddelere ait lazer tane boyut dağılım grafiği.

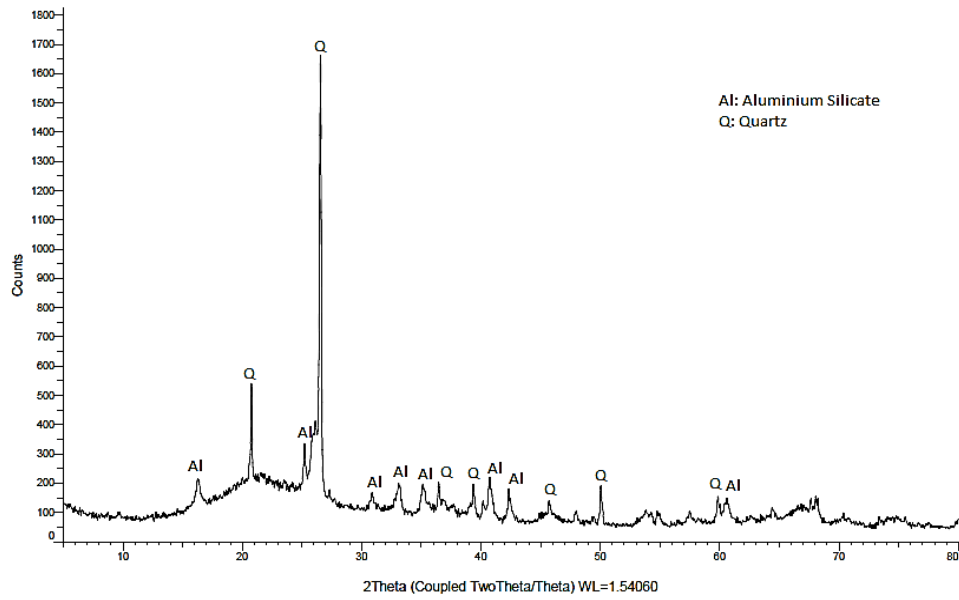
Zeolit, metakaolin ve YFC'nin mineralojik yapıları XRD yöntemi ile incelenmiştir. Zeolit'e ait XRD analizi Şekil 3.2'te verilmiştir. Zeolitin mineral bileşimindeki baskın

mineral Clinoptilolite tipi zeolit mineralidir.

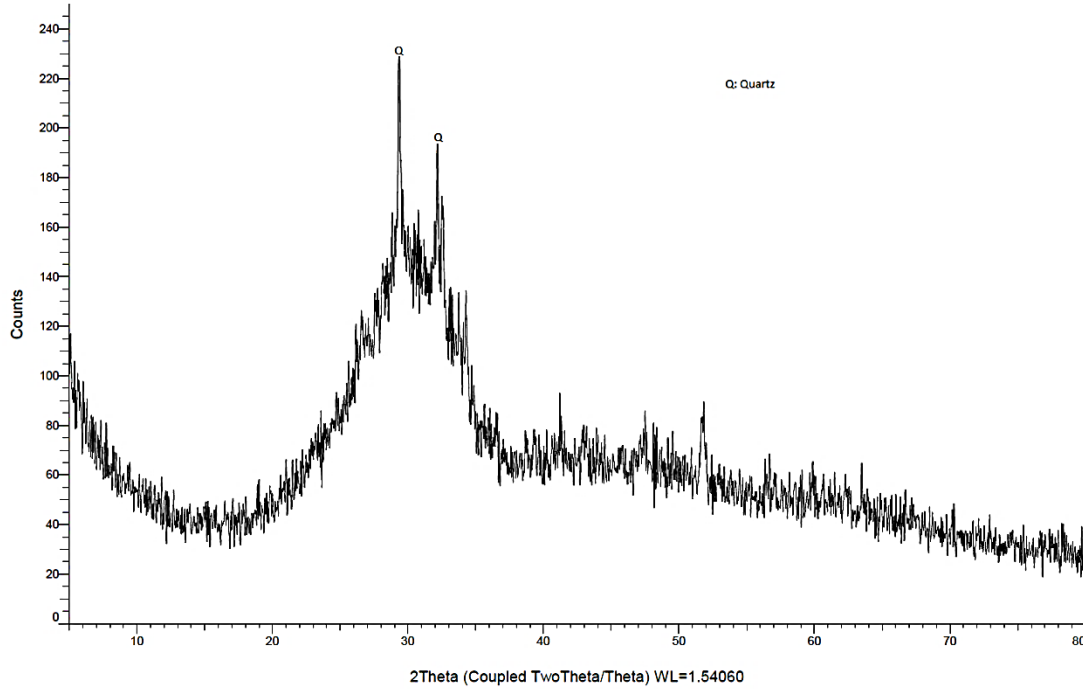


Şekil 3.2 Zeolite ait XRD analizi.

Metakaolinin mineralojik incelemesi sonucunda, krsital yapısında alüminyum silikat ve kuvarz pikleri bulunmuştur (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Metakaoline ait XRD analizi.

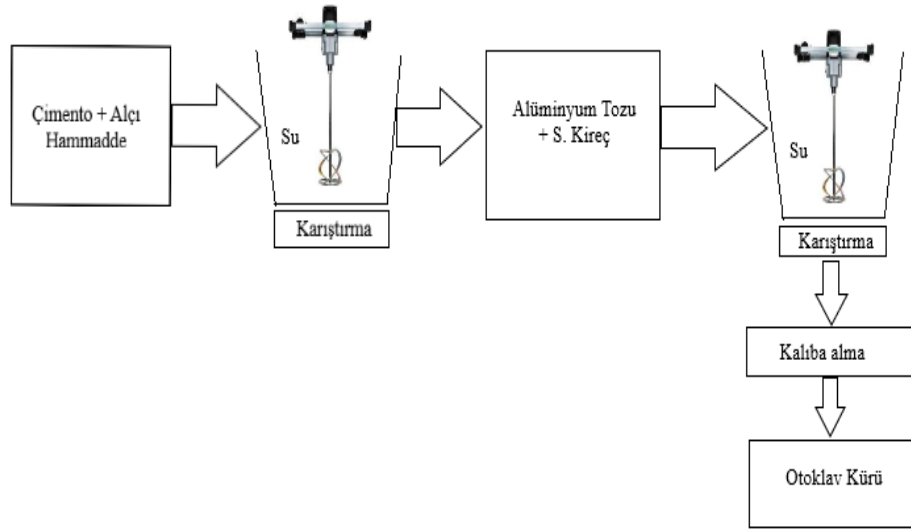


Şekil 3.4 YFC'ye ait XRD analizi.

XRD analizi yapılan YFC'nin amorf yapıda bulunduğu tespit edilmiştir. Özellikle 2θ 20° ve 30° bölgesindeki hump bölgesi amorf yapıyı ifade etmektedir. Ayrıca malzeme içinde kuvars pikleri de gözlenmiştir (Şekil 3.4).

3.2 Metot

Deney örneklerinin üretiminde, öncelikle kullanılan mineral malzeme, çimento ve alçı suya eklenerek el tipi mikser ile 3 dk. karıştırılmıştır. Karışımın kıvamı hazır duruma geldikten sonra, sönmemiş kireç ve alüminyum tozu da karışıma ilave edilerek mikser yardımıyla karıştırma işlemine 1dk daha devam edilmiştir (Şekil 3.5). Daha sonra karışım, önceden hazır hale getirilmiş olan 7 cm kenarlı küp kalıplar içerisine kalıp yüksekliğinin 2/3'ünü dolduracak seviyede yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen numunelerin, kabarmaları ve sertleşmeleri beklenmiştir. Kabarma süreci yaklaşık 20 dk. civarında gerçekleşmektedir. Kabarma ve sertleşmenin tamamlanmasının ardından kalıplardan çıkarılarak 172°C sıcaklıktaki otoklav içerisinde 8 bar buhar basıncı altında 8 saat süreyle kür işlemine tabi tutularak mukavemet kazanmaları sağlanmış, fiziksel ve mekanik deneyler için hazır hale getirilmişlerdir (Resim 3.2-3.3).



Şekil 3.5 Gazbeton üretim şeması.



Resim 3.2 Deney örneklerinin kür işlemi öncesi sertleştirilmesi.

Çalışma kapsamında 12 adet farklı karışımlarda deney numunesi üretilmiştir. İlk 6 seride akışkanlaştırıcı kullanılmamış ve ikinci grupta akışkanlaştırıcı kullanılarak, akışkanlaştırıcının etkisi incelenmiştir. Üretilen numunelere ait karışım değerleri ve karışım kodlamaları Çizelge 3.5’de verilmiştir. Karışımlar kütle ağırlıklarına göre oransal olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 Karışım oranları.

Seri Adı	Seri	Ç	Z	M	YFC	A	K	Al tozu**	S	S/Ç	S/T
Z	1	0,8	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	2,81	0,77
	2	0,7	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	3,21	0,80
	3	0,6	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	3,75	0,83
M	1	0,8	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	3,75	1,03
	2	0,7	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	4,28	1,07
	3	0,6	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	5,00	1,11
YFC	1	0,8	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	2,50	0,68
	2	0,7	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	2,85	0,71
	3	0,6	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	3,33	0,74
ZM	1	0,8	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	3,75	1,03
	2	0,7	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	4,28	1,07
	3	0,6	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	5,00	1,11
ZYFC	1	0,8	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	3,12	0,86
	2	0,7	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	3,57	0,89
	3	0,6	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	4,16	0,92
MYFC	1	0,8	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	3,50	0,96
	2	0,7	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	4,00	1,00
	3	0,6	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	4,66	1,03
Z*	1	0,8	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	2,81	0,77
	2	0,7	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	3,21	0,80
	3	0,6	1,5	-	-	0,3	0,3	%1	2,25	3,75	0,83
M*	1	0,8	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	3,75	1,03
	2	0,7	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	4,28	1,07
	3	0,6	-	1,5	-	0,3	0,3	%1	3,0	5,00	1,11
YFC*	1	0,8	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	2,50	0,68
	2	0,7	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	2,85	0,71
	3	0,6	-	-	1,5	0,3	0,3	%1	2,0	3,33	0,74
ZM*	1	0,8	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	3,75	1,03
	2	0,7	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	4,28	1,07
	3	0,6	0,75	0,75	-	0,3	0,3	%1	3,0	5,00	1,11
ZYFC*	1	0,8	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	3,12	0,86
	2	0,7	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	3,57	0,89
	3	0,6	0,75	-	0,75	0,3	0,3	%1	2,5	4,16	0,92
MYFC*	1	0,8	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	3,50	0,96
	2	0,7	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	4,00	1,00
	3	0,6	-	0,75	0,75	0,3	0,3	%1	2,8	4,66	1,03

Ç: Çimento, Z:Zeolit, M:Metakaolin, YFC: Yüksek fırın cürufu, A:Alçı, K: Sönmemiş Kireç, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz,

*Akışkanlaştırıcı katkı çimento miktarının %1'i oranında katılmıştır.

** Al tozu karışımında kullanılan çimento miktarının %1'i oranında katılmıştır.

Kür işlemi tamamlanan numuneler birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla değişmez kütleye gelinceye kadar 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüv içerisinde bekletilmişlerdir. Kuruma işlemi tamamlanan numuneler 0.1g hassasiyetli terazide tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıkları belirlenen numuneler üzerinde önce ultrases geçiş hızı deneyi daha sonra ise, 20 ton kapasiteli pres ile basınç

dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.4-3.5).



Resim 3.3 Deney örneklerinin otoklav içerisinde kür edilmesi.



Resim 3.4 Deney örneklerinin ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi.



Resim 3.5 Deney örneklerinin basınç dayanımlarının belirlenmesi.

3.2.1 Puzolanik Aktivite Deneyi

Puzolanların kimyasal bileşimleri büyük miktarda silis ve alümin içermektedir. Tane yapıları oldukça ince olan puzolanlar, söndürülmüş kireç ve suyla birleştirildiğinde, aralarında kimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucu çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan bağlayıcı özellikte kalsiyum silika hidrat jelleri oluşmaktadır (Erdoğan 2015).

Puzolan malzemelerin söndürülmüş kireç ve su ile birlikte hangi oranda reaksiyona girebileceği, ne oranda bağlayıcılık gösterebileceği, “puzolanik aktivite” olarak adlandırılmaktadır (Erdoğan 2015).

Puzolanik aktivite belirlenirken, “dayanım aktivite indeksi” olarak isimlendirilen bir değerin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer hesaplanırken formül (3.1)’den faydalanılmıştır.

$$\text{Puzolanik aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (3.1)$$

Burada,

A: Puzolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı

3.2.2 Birim Hacim Ağırlık Deneyi

Birim hacim ağırlık deneyi için otoklav küründen sonra örnekler etüv içersinde 105 ± 5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuşlardır. Ardından 0.1 g hassasiyetli terazide tartılarak ağırlıkları kaydedilmiştir. Örneklerin birim hacim ağırlık değerleri formül (3.2) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\Delta = \frac{W}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.2)$$

Δ : Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)

W: Etüv Kuru Ağırlığı (kg)

V: Numunenin Hacmi (m³)

3.2.3 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases cihazı ile, beton malzeme içine iletilen ses dalgalarının deney örneğinin bir yüzeyinden diğer bir yüzeyine geçiş süresi ölçülerek, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplaması yapılan ses dalgasının hızı ile beton malzemenin basınç dayanım değeri ve başka özellikleri arasında ilişki kurulabilmektedir. Ultrases cihazı, ses üstü dalgaların, problar arasında kalan ve belli bir uzunluğu olan açıklığı ne kadar zamanda geçtiklerini mikrosaniye biriminde belirtmekte ve cihazda bulunan ekrana aktarmaktadır (Erdoğan 2015). Ses üstü dalga'nın geçiş süresi makine üzerinde okunduktan sonra formül (3.3) yardımıyla dalga hızı hesap edilmektedir.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.3)$$

V= Ses üstü dalga hızı (km/sn) **L** = Problar arası mesafe (km) **t** = Zaman (sn)

3.2.4 Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, Yüksel Kaya Makinaya ait 20 ton yük kapasiteli tek eksenli basınç presinde 2,5 kgf/cm²/sn yükleme hızında gerçekleştirilmiştir (TS EN 679). Numunelerin basınç dayanımları formül (3.4) yardımıyla belirlenmiştir.

$$f_b = \frac{P_k}{A_0} \quad (3.4)$$

f_b = Basınç dayanımı (MPa) **A₀** = Yüzey alanı (mm²) **P_k** = Kırılma anındaki yük (N)

3.2.5 Dinamik Elastisite Modülü Deneyi

Dinamik elastisite modülü, genelde laboratuvar çalışmalarında betonların durabilite davranışı hakkında fikir tahmininde bulunmak için kullanılır. Beton malzemenin elastisite modülü ve dayanımı arasında bir ilişki vardır. Betonun kalitesine etki edebilecek her türlü etken elastisite modüllü değerinde de değişiklik yaratacaktır. Bu durumu statik elastisite modülü yöntemi ile takip edebilmek için çok miktarda deney numunesi üretmek ve farklı etkenlere maruz bırakarak gerilme-birim deformasyon eğrilerini oluşturmak gerekmektedir. Böyle bir durumda bile, aynı özellikler göstermesi beklenerek üretilen örneklerin üniformluklarında farklılık gözlenebilir. Fakat dinamik

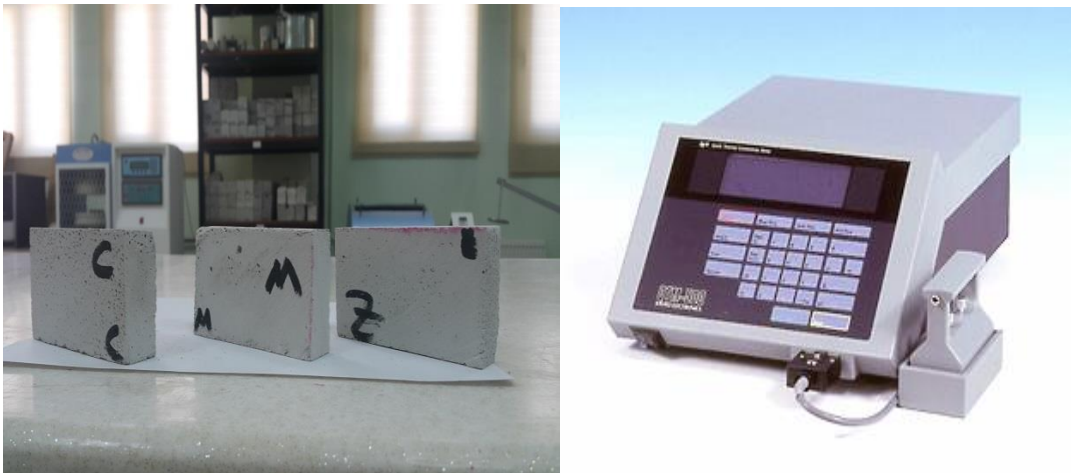
elastisite modülünü bulurken kullanılan ultrasonik yöntem hasarsız deney yöntemlerindendir. Bu deney yönteminin uygulanmasıyla beton malzemede deformasyon oluşumuna engel olunmaktadır. Böylece malzeme herhangi bir tahribata uğramadan dinamik elastisite modülü değerini belirleyebilmek ve malzemenin kalitesi hakkında fikir yürütebilmek gerçekleştirilebilmektedir (Erdoğan 2015). Dinamik elastisite modülü (E_d) hesaplanırken formül (3.5)'den faydalanılmıştır. (Yazıcı 2015).

$$E_d = 10^5 \times V^2 \times \beta / g \quad (3.5)$$

Burada **Ed**: Dinamik elastisite modülü (kgf/cm^2), **V**: ultrases hızı (km/sn), **β** : betonun birim ağırlığını (kg/dm^3), **g**: yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

3.2.6 Isı İletkenlik Deneyi

Isı transferi birbirinden farklı 3 yolla iletilir. Bunlar; iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıyım (radyasyon) şeklindedir (Altınışık 2016). Katı malzemelerin ısı iletkenliği, gözeneklilik derecesi ile birlikte gözenek boyutları ve dağılımına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Düzenli dağılımıya sahip çok küçük hava gözenekleri olan bir yapı malzemesinin ısı iletkenliği düzensiz dağılmış büyük gözenekli bir yapı malzemesine göre daha küçük değerler alabilir (Diamant 1986).



Resim 3.5 Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı ve deney örnekleri.

Isı iletkenlik katsayıları İzmir Yüksek Teknoloji Üniversitesi Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında %5 ölçüm hassasiyeti, -10 - 200 °C sıcaklık aralığında ve 0,023-11,63 W/mK ölçüm aralığında ölçüm yapabilen KEM QTM 500 cihazı ile 2x5x10 cm boyutlarındaki örnekler üzerinde ölçülmüştür (Resim 3.5). 3 adet numunenin ısı iletim katsayıları, ön ve arka yüzlerinden üçer ölçüm alınarak belirlenmiştir.

3.2.7 Rötire Deneyi

Çimento hamurunun prizini tamamlaması sonucu bümnyesinde kuruma kaynaklı hacimsel küçülmeler oluşmaktadır. Hacimsel küçülmelerin devam etmesindeki en büyük etken kuru ortam varlığı ile su kaybının devam etmesidir. Çimento esaslı malzemelerde kuruma kaynaklı rötrenin sebebi çimento hamuru içerisinde hidrate CSH jellerinin bünyesindeki nemi kaybetmesidir. Çimento hamurundaki kuruma sonucu, kılcal boşluklarda bulunan su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı gerçekleşmekte ve sonrasında da buharlaşmaktadır. Bu durumla birlikte adsorbe edilmiş su tabakası incelmekte ve tanecikler yaklaşarak hacim küçülmesi gerçekleşmektedir (Uysal vd. 2012).

Örneklerin rötire ölçümleri komparator yardımıyla yapılmıştır (Resim 3.6). Komparatorların böümleri genelde 0,01 ve 0,001'i gösterecek şekilde dizayn edilmiştir. Komparatorlar kaldıraç prensibiyle ölçüm yapan cihazlardır. Deney numunesinin ucuna temas eden komparator tuşunun hareket etmesi, numunedeki değişiminin 0,01 veya 0,001mm değerleri arasında görülmesine neden olur. Komparator kadranının çevresi 100 eşit aralığa ayrılmıştır. İbrenin bir tam devir hareketi ile 1mm'lik aşağı veya yukarı yönde hareket gerçekleşir. Kadranın alt kısmında 10 eşit parçaya ayrılmış mm göstergesi bulunmaktadır. Büyük ibre ve küçük ibre senkronize hareket etmektedir. Küçük ibredeki bir tam devir hareketi ile uç 10 mm hareket etmektedir. Komparator kadranı çevresi 100 eşit aralığa ayrılmış bulunduğundan çevredeki iki çizgi arası $1/100 = 0,01$ mm olarak elde edilir. Bu durumda örnek olarak; ibre kadran etrafında 10 çizgi ilerlediğinde, uç 0,10 mm hareket gerçekleştirecektir (Demir vd. 2016).

Rötire ölçümleri TS EN 680'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Gazbeton harçlarının

boy değişim özelliklerini incelemek üzere prizmatik harç çubukları hazırlanmıştır. Harç çubuklarının kalıp içindeki boyları 25x25x285 mm'dir. Her seri için üç adet harç çubuğu üretilmiştir. Harç çubuklarına otoklavda 8 Bar basınç altında 8 saat basınçlı buhar kürü uygulanmıştır. Harç çubuklarının kalıptan çıktıkları durumdaki boyları ve otoklav işleminden sonraki etüv kurusu boyları komparatör cihazı ile ölçülmüş ve formül (3.6)'ya göre hesaplanmıştır (Resim 3.6).

$$R = \frac{\Delta l}{l} \times 1000 \quad (3.6)$$

R: Rötire

Δl : Boy farkı (mm)

l: İlk Boy (285 mm)

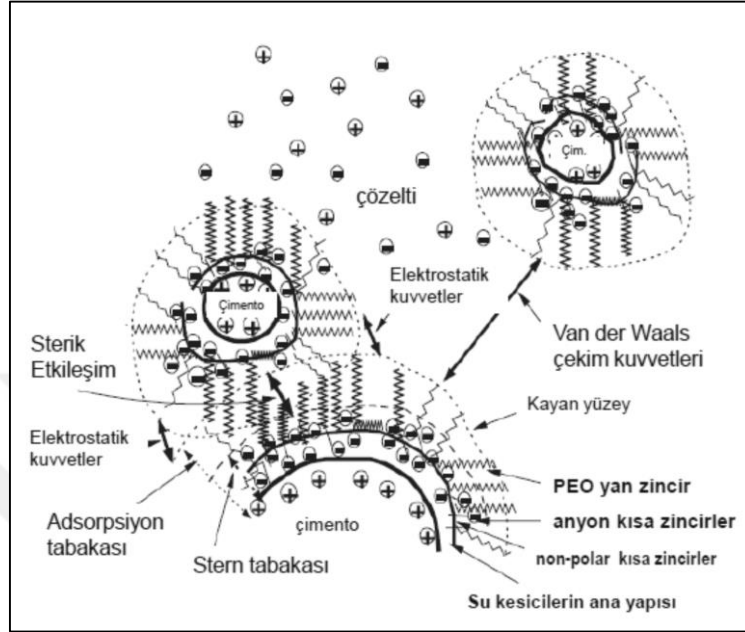


Resim 3.6 Komparatör.

3.2.8 Akışkanlık Deneyi

Akışkanlaştırıcı malzemeler su içinde çözünen boşluklu yapıdaki diziliş ile suyun yüzey gerilimini azaltan ve betonun içine bir miktar hava sürüklemek suretiyle çimento topaklaşmasını engelleyen organik kimyasallardır (Şekil 3.6). Akışkanlaştırıcı malzemeler pratikte s/ç oranını düşürmek suretiyle yüksek dayanım elde etme, büyük kütleli beton üretimlerinde hidrasyon ısısında azalış gerçekleştirmek için çimento

oranını azaltma ve işlenebilme özelliklerinde iyileştirme gerçekleştirmek maksadıyla tercih edilmektedirler (Topçu vd. 2004).

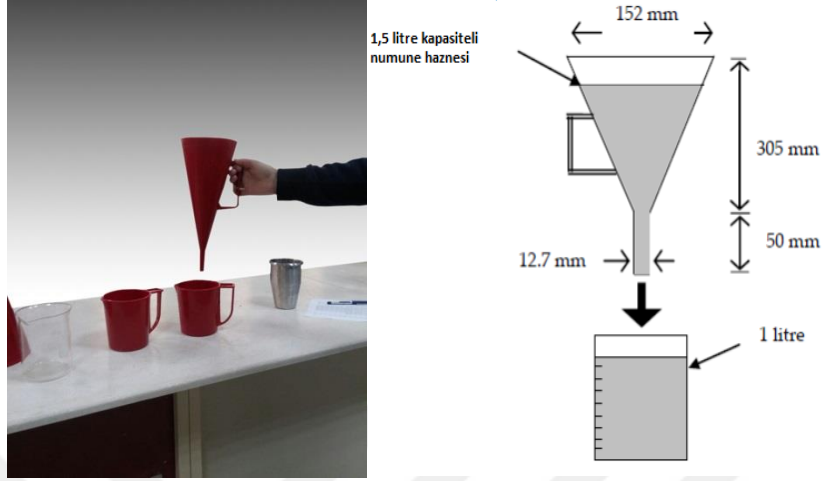


Şekil 3.6 Akışkanlaştırıcı çalışma prensibi (Gökçe 2017).

Akışkanlaştırıcı katkıları ideal şartlar altında beton karışımı içerisine dahil edildiklerinde aynı işlenebilme özelliklerini gerçekleştirmek şartıyla beton karışım suyu azaltma sağlayabilirler. Karışım suyu oranı değiştirilmeden akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde işlenebilme özellikleri oldukça gelişecek ve pompa betonlarında uygulanabilirlik artış gösterecektir. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile, S/Ç oranının sabitlenmesi halinde kullanılan su ve çimento miktarındaki azalmayla ekonomiklik elde edilecektir (Topçu vd. 2004).

Üretilen gazbeton deney örneklerinin akışkanlık özelliklerini belirlemede Marsh Hunisi metodu kullanılmıştır (Resim 3.7). Bu yöntem temel olarak 1,5 litrelik döküme hazır harcın basit bir huniden 1 litrelik harç kısmının akma süresinin ölçülerek not edilmesi prensibine dayanmaktadır. Akış süresinin ölçülmesinin yanında akma davranışı da görsel olarak belirlenerek not edilir. Buna göre 1 litrelik taze harcın 1 dakikanın altında akması durumu sabit ve düzenli akış olarak değerlendirilir. Akış süreleri 1 dakikayı

geçen harçlar ise engelli veya zor akış olarak not edilir. Harç akıyorsa “akmadı” olarak not edilir (Mohammad 2011).



Resim 3.7 Marsh hunisi ölçüm metodu.

3.2.9 Makroyapı Çalışmaları

Makroyapı çalışmaları kısmında, deney örnekleri küçük kesitler halinde çıkartıldıktan sonra karbon kaplama yapılarak SEM cihazında incelenmeye hazır hale getirilmişlerdir. Örneklerin gözenek yapısının fotoğraflama işlemleri Zeiss marka EVO LS 10 modelinde SEM cihazı ile 45 büyütme oranında gerçekleştirilmiştir (Resim 3.8). Ölçeklendirme işlemi biten fotoğraflar Image Pro-Plus paket programı yardımıyla analiz edilmiştir.



Resim 3.8 SEM cihazı.

3.2.10 Mikroyapı Çalışmaları

Elektron mikroskop çimento bazlı malzemelerin mikroyapısının incelenmesinde kullanılan en güçlü tekniklerden biridir (Scrivener *et al.* 2016). Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yüksek çözünürlükte resim yaratmak için vakumlu ortamda yaratılan ve aynı ortamda elektromanyetik lenslerle inceltiren elektron demeti yardımıyla gözlemlenecek malzemeyi analiz etme imkânı sağlar. Mikroskopta yaratılan resimler, elektron demeti ve malzeme arasında gerçekleşen etkileşim sonucu açığa çıkan ışınım veya geri yansıyan elektronların sayılmasıyla gerçekleştirilir (Hitit 2011).

SEM' de görüntü elde etmek için genellikle, elektron demeti tarafından uyarılan numune atomlarının yaydığı ikincil elektronlardan (SE) faydalanılır. Numunenin farklı bölgelerinden kopan ikincil elektronların sayısındaki değişim öncelikle demetin yüzeyle buluşma açısına, yani yüzeyin topografisine bağlıdır. İkincil elektronların yanında geri saçılan elektronlar (BSE), karakteristik X-ışınları, ışık (katot ışını) (CL), numune akımı ve aktarılan elektronlarla da numuneden çeşitli sinyaller elde edilerek amaca uygun topografi ve kompozisyon analizleri yapılır (İnt. Kyn. 3).

X ışınları yardımı ile madde analizi, madde karakteristiğini yansıtan kırınım deseni üzerinden yapılır. Hanawalt 1936 tarihinde belirli maddelere ait kırınım desenlerinden bir koleksiyon oluşturmuştur. Bu tarihten itibaren maddelere ait kırınım desenlerinin sayıları artış göstermiştir. Analiz edilen örneklerde hangi maddelerin bulunduğu, analiz edilen örneğin kırınım deseninin diğer desenlerle karşılaştırılması ile bulunur. Analiz edilmiş desenlerden oluşturulan koleksiyon Hanawalt, Rim ve Frevef tarafından gerçekleştirilmiş ve ardından ASTM (American Society For Testing and Materials) bu işi devam ettirmiş ve desenler için 3x5 inç ebatlarında analiz kartları oluşturmuştur. (Bulmuş ve Yıldırım, 2009). Çalışmada SEM incelemeleri AKÜ TÜAM Lab. ve Adıyaman Üni. Merkezi Arş. Laboratuvarında, XRD incelemeleri ise AKÜ TUAM Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.11 Donma Çözünme ve Kapiler Su Emme Deneyi

Hazırlanan gazbeton örneklerinin donma-çözünme deneyi TS EN 772-18'e göre

gerçekleştirilmiştir. Donma sıcaklığı -15 °C ve çözülme sıcaklığı +20 °C olan 3 saatlik toplam 50 çevrim uygulanmıştır. Donma-çözünme aşamaları birbirini takip edecek şekilde uygulanmıştır. 50 çevrim sonunda donma-çözünme kabininden çıkarılan numunelerde dayanım kaybı değeri formül (3.7) ile belirlenmiştir.

$$R_c = \frac{f_n - f_f}{f_n} \times 100 \quad (3.7)$$

Denklemden;

R_c : Dayanımdaki azalma (%), f_n = Donma çözünmeye maruz bırakılmayan numunelerin ortalama basınç dayanımı (MPa), f_f = Donma çözünmeye maruz bırakılan numunelerin ortalama basınç dayanımı (MPa)'dır.

Deney örneklerinin kapiler su emme deneyi TS EN 772-11'e göre gerçekleştirilmiştir. Kapiler su emme değerleri formül (3.8) ile belirlenmiştir.

$$C_{w,s} = \frac{m_{so,s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{so}}} \quad (3.8)$$

Denklemden;

$C_{w,s}$: kapiler su emme katsayısı $\text{kg}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$,

$m_{dry,s}$: Deney numunesinin kurutma sonrasındaki kütlesi (kg),

$m_{so,s}$: Deney numunesinin (t) süreyle suya temas ettirildikten sonraki kütlesi (kg),

A_s : Deney numunesinin suya temas ettirilen yüzeyinin brüt alanı (m^2),

t_{so} : Deney numunesinin suya temas ettirilme süresidir.

3.2.12 Su Buharı Difüzyonu Direnç Katsayısı Deneyi

Su buharı difüzyonu direnç katsayısı çalışmaları belirlenen gazbeton deney örnekleri üzerinde TS EN 772-15'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Puzolanik Aktivite Bulguları

ASTM C 311'e göre 500 g Portland çimentosu + 1375 gr kum + 242 ml su kullanarak kontrol harcı hazırlanmaktadır. Daha sonra da 400 g Portland çimentosu + 100 gr puzolan + 1375 gr kum + kontrol karışımının gösterdiği akmayı sağlayabilecek kadar su kullanılarak puzolanlı harç elde edilmektedir. Hazırlanan puzolanlı harçlara ilişkin karışım oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Hazırlanan harçlar 5 cm kenarlı küp numunelere alındıktan sonra 7 ve 28 günlük aktivite deneyleri için hazır hale getirilmişlerdir.

Çizelge 4.1 Puzolanlı harçların karışım oranları.

Seri Adı	Portland Çimento (gr)	Kum (gr)	Puzolan (gr)	Su (ml)
Şahit	500	1375	-	242
Zeolit	400	1375	100	324
Metakaolin	400	1375	100	300
YFC	400	1375	100	262

7 ve 28 gün boyunca uygun kür koşulları altında bekletilen puzolanlı harçlara ilişkin puzolanik aktivite indeksi bulguları bulguları ve sınır değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

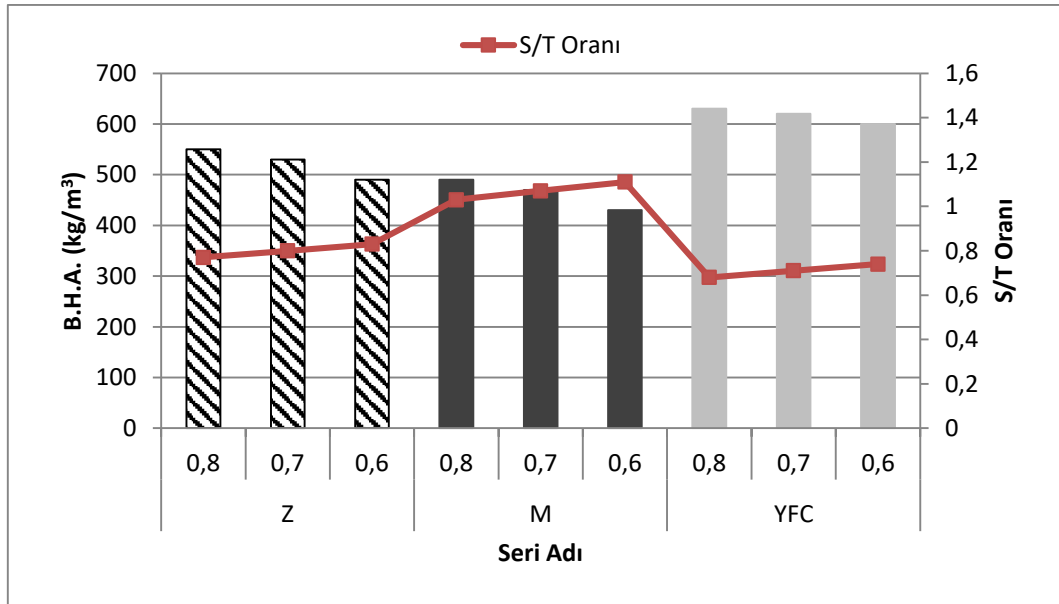
Çizelge 4.2 Puzolanik aktivite indeksi bulguları.

	7 günlük dayanım (MPa)	Puzolanik aktivite indeksi 7 gün (%)	28 günlük dayanım (MPa)	Puzolanik aktivite indeksi 28 gün (%)	ASTM C 311	TS EN 450
Şahit	33,68	100,00	42,44	100,00		
Zeolit	17,04	50,58	26,28	61,92	%75	%70
Metakaolin	24,07	71,49	31,32	73,80		
YFC	26,58	78,93	33,85	79,75		

Dayam aktivite indeksi ASTM C 311'e göre en az %75, TS EN 450'ye göre ise en az %70 olmalıdır. Çizelge 4.2 incelendiğinde en yüksek puzolanik aktivite indeksi değerleri YFC katkılı harçlarda bulunurken en düşük değerler zeolit katkılı harçlarda bulunmuştur. YFC katkılı harçların 7 günlük puzolanik aktivite değer ortalamaları %78,93 28 günlük puzolanik aktivite değer ortalamaları ise %79,75 olarak bulunmuştur. Metakaolin katkılı harçların puzolanik aktivite değer ortalamaları 7 günlük %71,49, 28 günlük %73,80 olarak tespit edilmiştir. Zeolitin puzolanik aktivite indeksi değerleri incelendiğinde ise 7 günlük serilerde %50,58 iken 28 günlük serilerde %61,92 olarak tespit edilmiştir. Zeolitin puzolanik özelliğe sahip olmadığı belirlenmiştir.

4.2 Birim Hacim Ağırlık Bulguları

Bu bölümde, üretilen gazbeton deney örneklerine ait B.H.A bulguları verilmiştir. Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları Şekil 4.1'de verilmiştir. Zeolit ile üretilen serilerin B.H.A değerleri 550 ile 490 kg/m³ aralığında aralığındadır. Metakaolin ile üretilen serilerin B.H.A değerleri 490 ile 430 kg/m³ aralığındadır. Yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerin ait B.H.A değerleri 630 kg/m³ ile 600 kg/m³ aralığındadır.

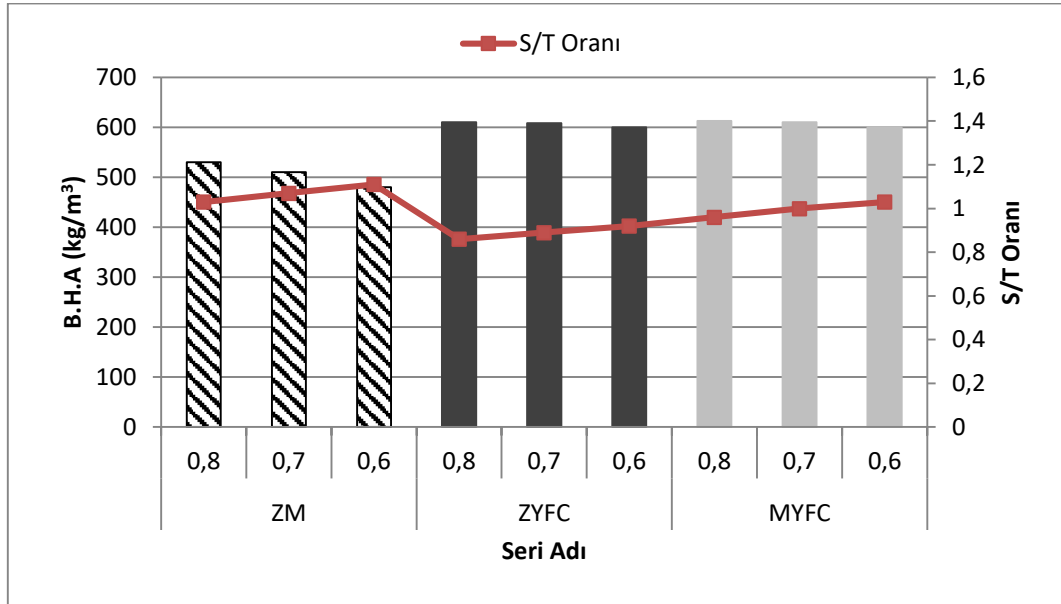


Şekil 4.1 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları.

Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen seriler incelendiğinde, tüm serilerde en yüksek

B.H.A değerleri 0,8'lik oranla, çimento oranının en yüksek olduğu serilerde gözlenmiştir. Çimento oranının düşmesi ile birlikte tüm serilerin B.H.A değerlerinde düşüş gözlenmiştir. En düşük B.H.A değeri 430 kg/m^3 ile metakaolin ile üretilen serilerde, en yüksek B.H.A değerleri ise 630 kg/m^3 ile YFC ile üretilen serilerde gözlenmiştir. Çimento oranındaki düşüşle birlikte B.H.A değerleri de düşmüştür. Birim hacim ağırlık değerlerinde ki farkların ortaya çıkmasında kullanılan malzemelerin özgül ağırlık ve özgül yüzey alanlarındaki farklılığın etkili olabileceği düşünülmektedir.

Zeolit, metakaolin ve YFC'nin birbirleri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları Şekil 4.2'de verilmiştir. Zeolit ve metakaolin kullanılarak üretilen serilerin B.H.A değerleri 530 kg/m^3 ile 480 kg/m^3 aralığındadır. Zeolit ve YFC kullanılarak üretilen serilerin B.H.A değerleri 610 kg/m^3 ile 600 kg/m^3 aralığında, metakaolin ve YFC kullanılarak üretilen serilerin B.H.A değerleri ise 613 kg/m^3 ile 600 kg/m^3 aralığında değişmektedir. Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılmasıyla birlikte elde edilen serilerde YFC'nin etkisiyle birlikte B.H.A değerlerinde artış elde edilmiştir. YFC'nin özgül ağırlık değerinin zeolit ve metakaoline göre daha yüksek oluşu bu durumun gerçekleşmesine sebep olabilir.

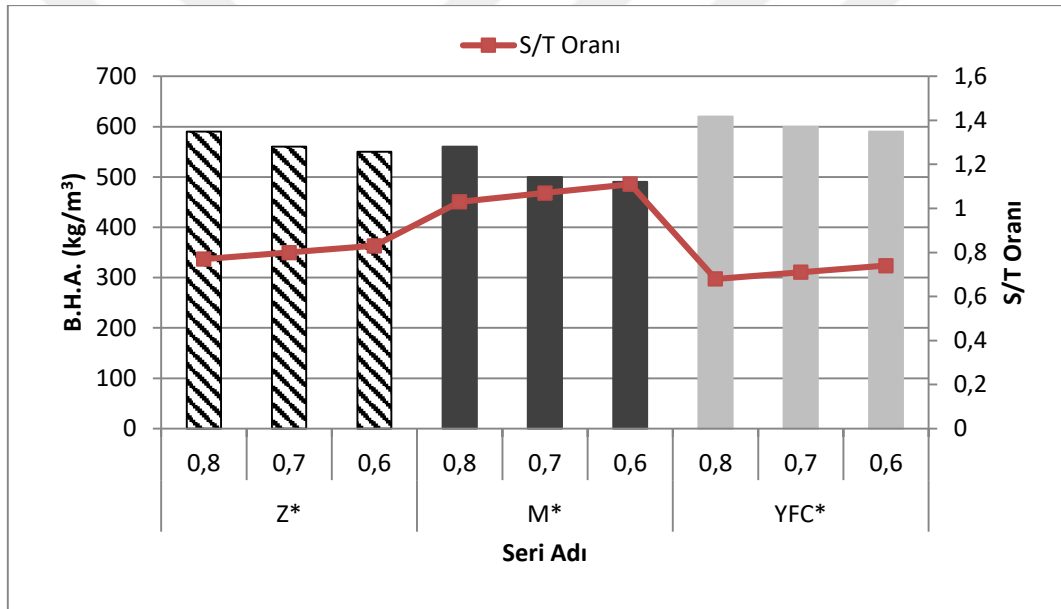


Şekil 4.2 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları.

Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu elde edilen serilerde en düşük B.H.A değerleri 480 kg/m^3 olarak zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerde elde

edilmiştir (Şekil 4.2). Zeolit ve YFC ile üretilen seriler ile, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerde elde edilen değerler birbirine yakın çıkmıştır. Yüksek fırın cürufu malzemenin özgül ağırlığının zeolit ve metakaoline kıyasla daha yüksek oluşu beraber kullanıldığı karışımların B.H.A değerlerinde de artışa yol açmıştır.

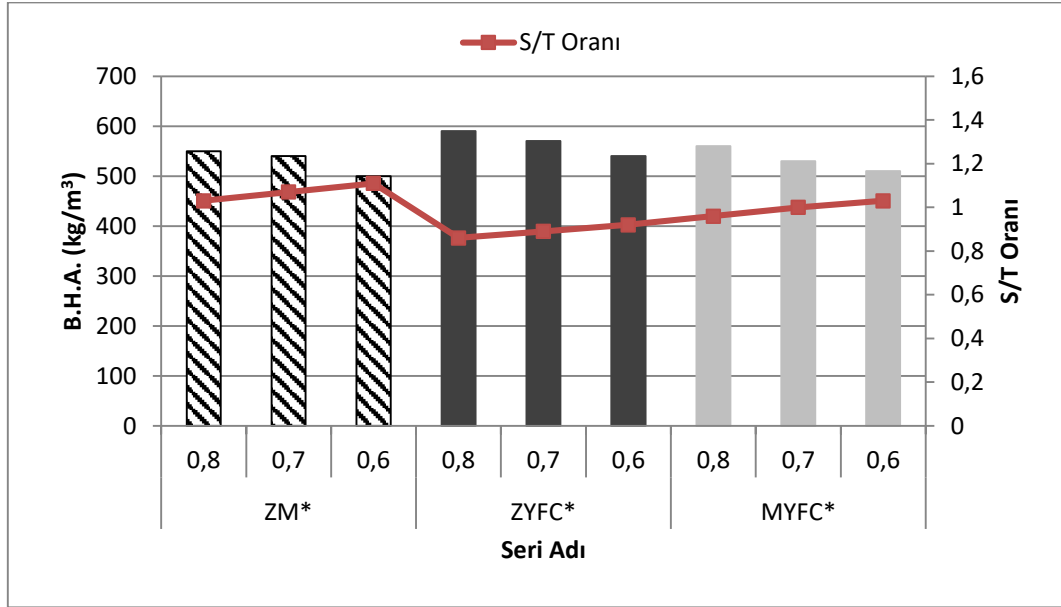
Serilerin reolojik özelliklerini iyileştirebilmek amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı kullanarak zeolit, metakaolin ve YFC ile deney örnekleri de üretilmiştir. Kullanılan hammaddeler bu üretim prosesinde de kendi aralarında karıştırılmıştır. Şekil 4.3’de zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları verilmiştir.



Şekil 4.3 Zeolit, Metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları.

Akışkanlaştırıcı katkı ile birlikte üretilen serilerin B.H.A bulguları incelendiğinde en düşük B.H.A değeri 490 kg/m³ olarak metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde bulunmuştur. En yüksek değerler ise YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde 620 kg/m³ olarak bulunmuştur. Zeolit ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin B.H.A değerleri ise 590-550 kg/m³ aralığında bulunmuştur. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile, özellikle YFC ile üretilen serilerde akışkanlaştırıcı kullanılmadan üretilen serilere göre daha düşük B.H.A değerleri elde edilmiştir. Akışkanlaştırıcılar su içerisinde eriyen ve suyun yüzey gerilimini düşüren organik maddeler olup beton içerisine hava sürükleyerek çimento topaklaşmasını engellemektedirler (Rixom and

Mailvanagam 1999). Sürüklemiş oldukları bu havanın üretilen deney örneklerinin B.H.A değerlerindeki düşüşe sebep olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.4 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları.

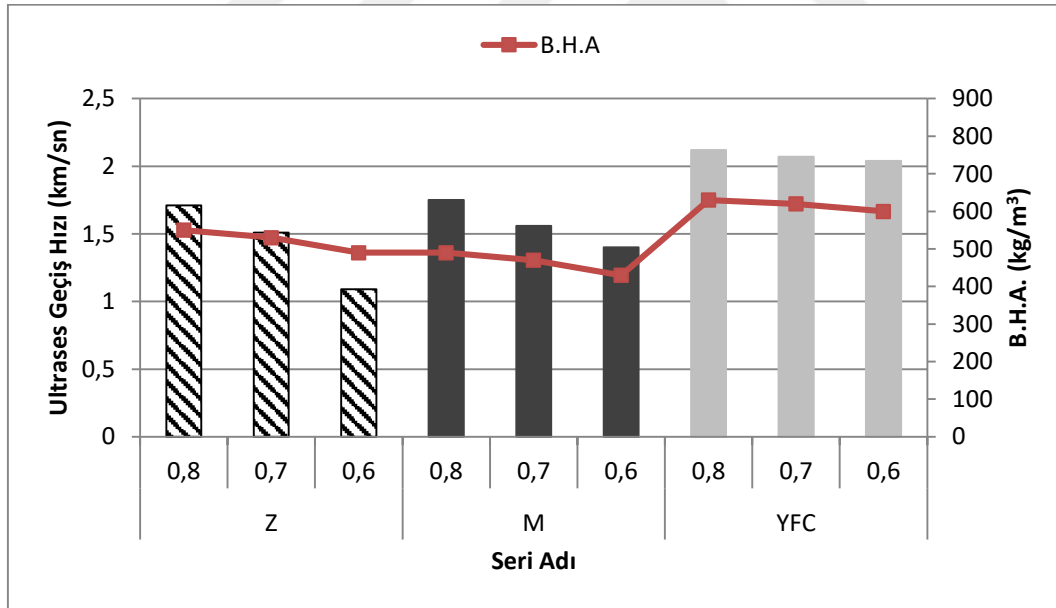
Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkının birbirleri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait B.H.A bulguları Şekil 4.4'de verilmiştir. Zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin B.H.A değerleri 550-500 kg/m³ aralığında bulunmuştur. Zeolit, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin B.H.A değerleri 590-540 kg/m³ aralığında bulunmuştur. Metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin B.H.A değerleri ise 560-510 kg/m³ aralığında bulunmuştur.

Bu seriler arasında en düşük B.H.A değerleri zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerde elde edilirken, en yüksek değerler ise zeolit ve YFC'nin birlikte kullanıldığı serilerde bulunmuştur. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile birlikte YFC'nin karışıma dahil edildiği serilerin B.H.A değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı, hammaddelerin tek olarak ve birbirleri arasında kullanılması sonucunda, YFC'nin bulunduğu serilerde B.H.A değerlerini azaltıcı yönde etki ettiği elde edilmiştir. Tüm serilerde çimento oranındaki azalış S/Ç oranı ve S/T oranı arttırmış, bu durum karışımlardaki bağlayıcı ve katı miktarındaki azaltıcı yönde etkilemiş ve B.H.A değerlerini azaltmıştır.

4.3 Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

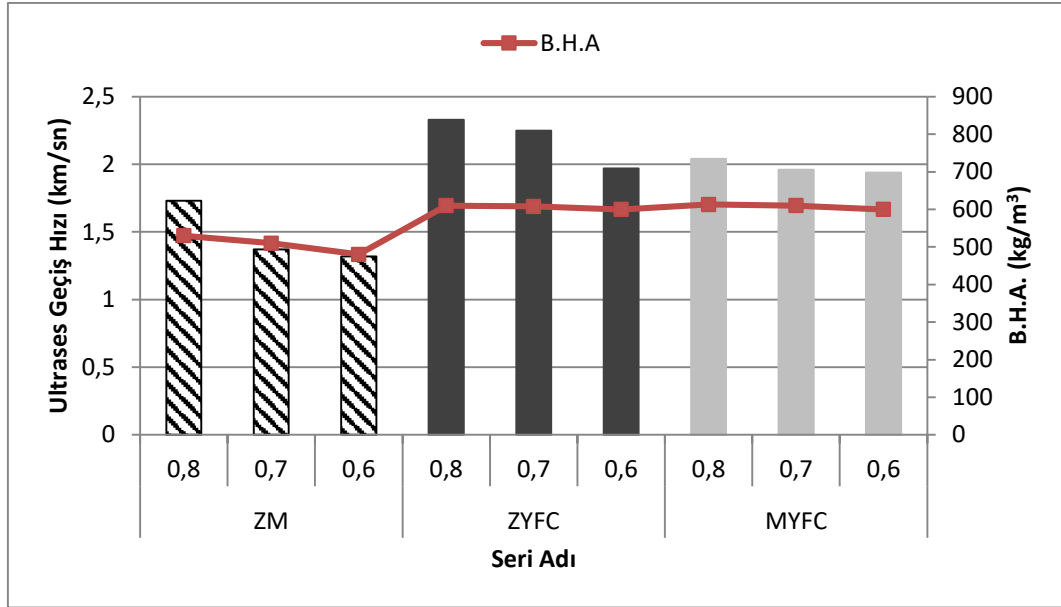
Bu bölümde üretilen deney örneklerine ait ultrases geçiş hızı bulguları verilmiştir. Deney örneklerinin ultrases geçiş hızları bulunurken, karşılıklı her iki yüzeylerinden okuma yapılmış ve bu okumaların ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Okumalar mikrosaniye olarak kaydedildikten sonra problemler arası mesafe kullanılarak km/sn değerine çevrilmiştir.

Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait ultrases geçiş hızı bulguları Şekil 4.5’de verilmiştir. En yüksek geçiş hızı bulguları YFC ile üretilen serilerden elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızının B.H.A değerleri ile ilişkisi bulunmaktadır. Birim hacim değeri yüksek olan serilerin daha yoğun yapıda olmasından dolayı ultrases geçiş hızının da yüksek olması beklenmektedir. Deneylerden elde edilen bulgular bu bilgileri doğrular niteliktedir.



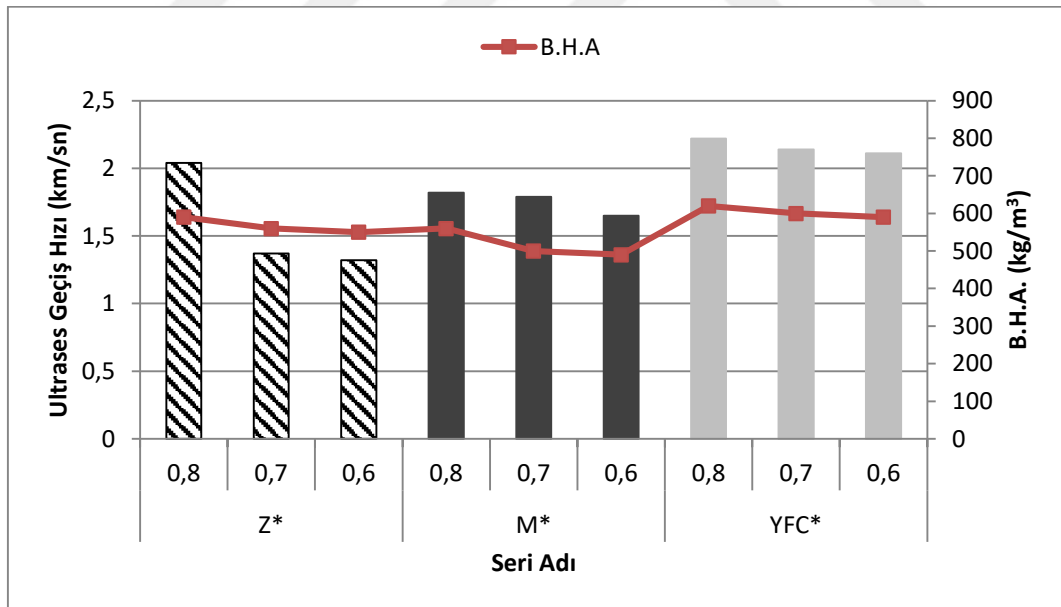
Şekil 4.5 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları.

Kullanılan hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu üretilen deney örneklerine ait ultrases geçiş hızı bulguları Şekil 4.6’da verilmiştir. En yüksek değerler zeolit ve YFC ile birlikte üretilen serilerde elde edilmiş olup, en düşük değerler zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerde elde edilmiştir.

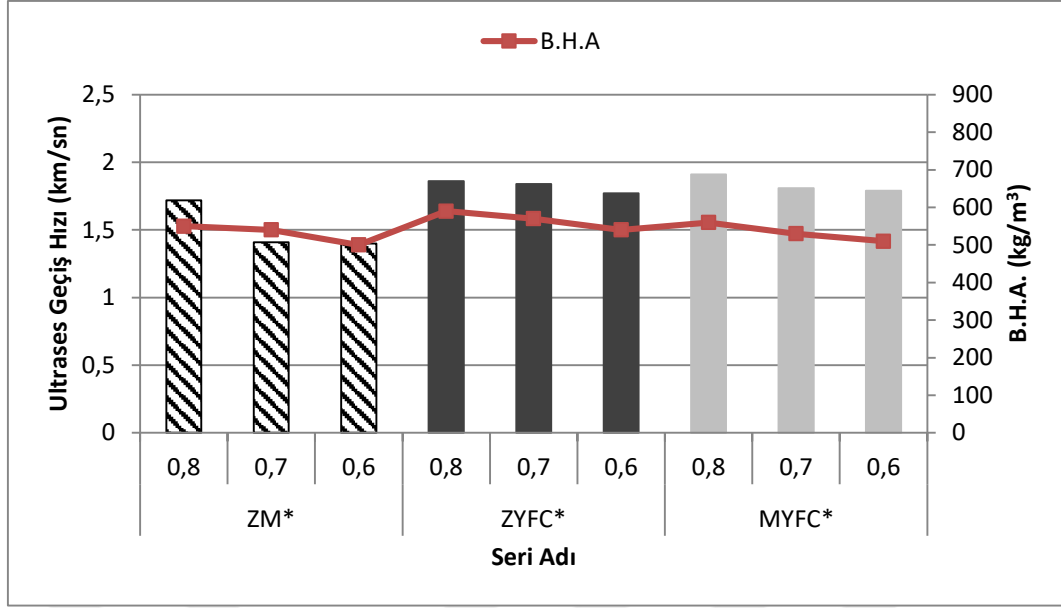


Şekil 4.6 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları.

Akışkanlaştırıcı katkı ile birlikte üretilen serilere ait ultrases geçiş hızı bulguları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7 Zeolit, MK, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları.

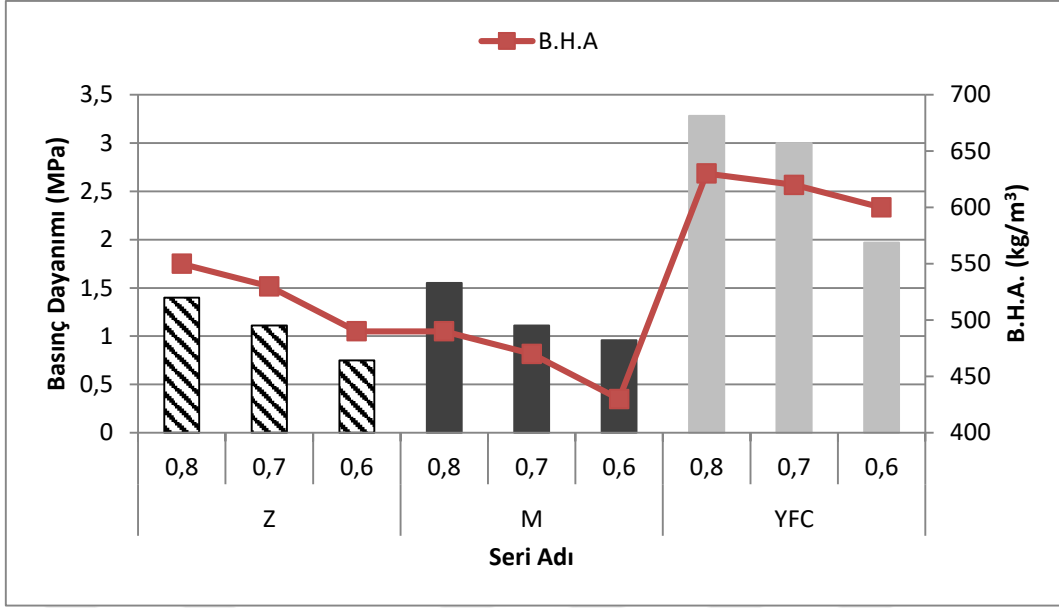


Şekil 4.8 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin ultrases geçiş hızı bulguları.

Akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerde en yüksek ultrases geçiş hızı değerleri YFC ile üretilen serilerde bulunurken, en düşük geçiş hızı değerleri metakaolin ile üretilen serilerde bulunmuştur. Birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığında en düşük değerler de metakaolin ile üretilen serilerde elde edilmiştir. Birim hacim ağırlık değerlerinin düşük olması malzemenin daha poroz yapıda olmasına ve ses üstü dalgaların malzemenin içerisinden daha uzun sürede geçmesine sebep olmaktadır.

4.4 Basınç Dayanımı Bulguları

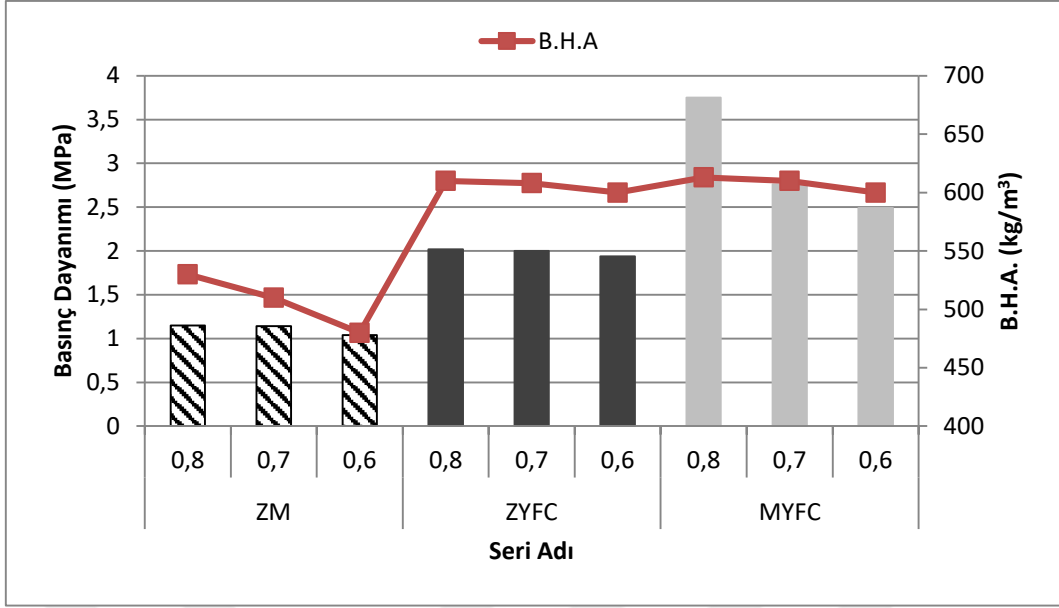
Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait basınç dayanımı bulguları Şekil 4.9'da verilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerleri YFC ile üretilen serilerde bulunmuş olup, zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri YFC ile üretilen serilere kıyasla daha düşüktür. En düşük dayanım değerleri ise zeolit ile üretilen serilerde bulunmuştur.



Şekil 4.9 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları.

Zeolit ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri karışımdaki en yüksek çimento oranında 1,4 MPa, en düşük çimento oranında 0,75 MPa olarak bulunmuştur. Metakaolin ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 1,55 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde 0,96 MPa olarak bulunmuştur. YFC ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 3,28 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 1,97 MPa olarak bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerin B.H.A değerlerinin zeolit ve metakaolin ile üretilen serilere göre daha yüksek olması basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek çıkmasına etki etmiş olabilir. Ayrıca hammaddelerin puzolanik aktivite indeksleri incelendiğinde YFC'nin puzolanik aktivite değeri zeolit ve metakaoline göre daha yüksek değerlerdedir. Bu durumun, dayanımda etkili olan hidrasyon ürünlerinin puzolanik reaksiyon ile daha fazla oluşmasına sebep olması sonucu, basınç dayanımlarındaki bu farkların oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu üretilen serilere ait basınç dayanımı bulguları Şekil 4.10'da verilmiştir.

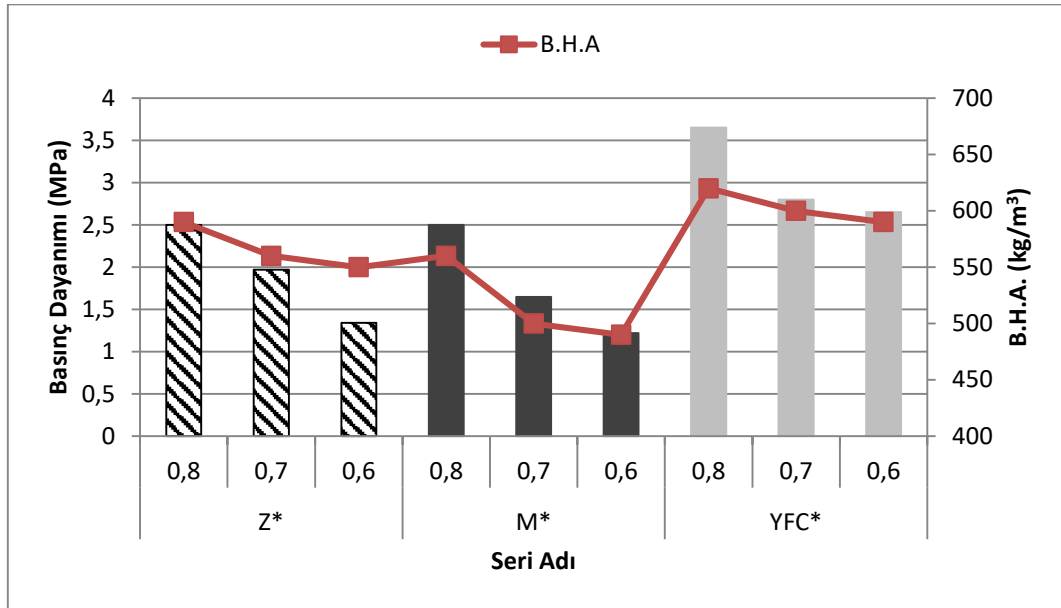


Şekil 4.10 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları.

Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu üretilen serilerde en yüksek basınç dayanımı değerleri, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerde en düşük basınç dayanımı değerleri ise zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerde bulunmuştur. Metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 3,75 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 2,49 MPa olarak bulunmuştur. Zeolit ve YFC ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 2,02 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 1,94 MPa olarak bulunmuştur. Zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 1,15 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 1,04 MPa olarak bulunmuştur. Hammaddelerin karıştırılması sonucu üretilen serilerin basınç dayanımı değerlerine göre, metakaolin ve YFC'nin birbiriyle çalışmasının diğer serilere kıyasla daha iyi olduğu görülmektedir. Metakaolin ve YFC'nin puzolanik aktivite indeks değerleri zeolite göre daha yüksek bulunmuştur. Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu üretilen serilerin basınç dayanımları değerlerinin, puzolanik aktivite indeks değerleriyle benzerlik gösterdiği, aktivite indeks değerlerinin basınç dayanımını doğrudan etkilediği söylenebilir. Ayrıca YFC'nin katıldığı tüm serilerde, basınç dayanımı değerlerine pozitif yönde katkı sağladığı gözlenmiştir.

Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilere ait basınç dayanımı

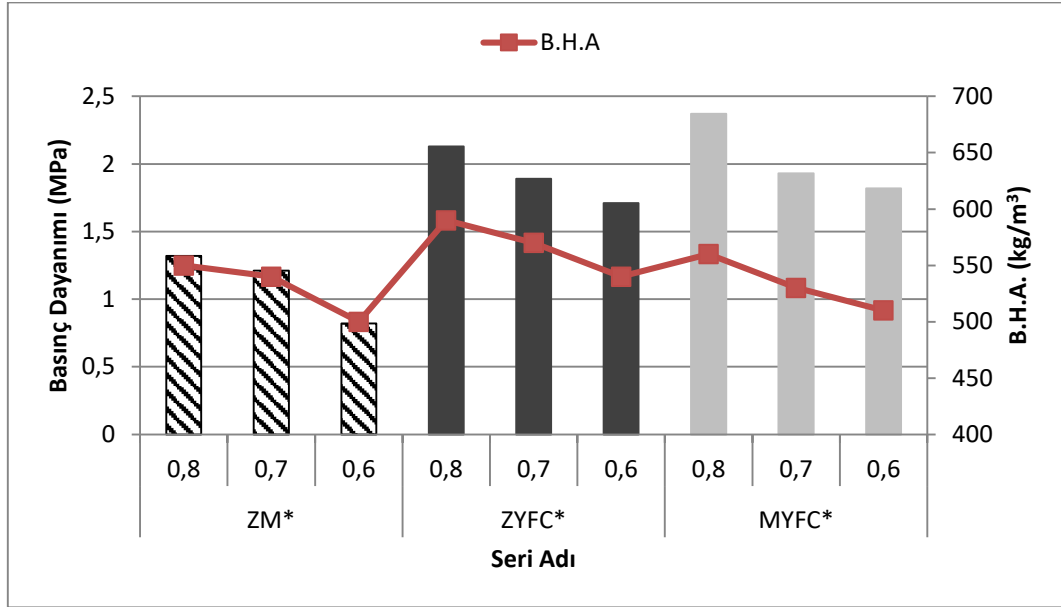
bulguları Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları.

Serilerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı değerleri, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde, en düşük dayanım değerleri ise metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 3,65 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde 2,65 MPa olarak bulunmuştur. Zeolit ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 2,50 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde 1,34 MPa olarak bulunmuştur. Metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 2,50 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 1,22 MPa olarak bulunmuştur. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri, katkı kullanılmadan üretilen serilere göre daha yüksek değerlerdedir. Buna sebep olarak, akışkanlaştırıcı katkının gazbeton deney örneklerinin kıvam özelliklerini iyileştirerek, karışımların kohezyonunu arttırdığı ve basınç dayanımı değerlerine olumlu yönde katkı sağladığı düşünülmektedir.

Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılması ile üretilen serilere ait basınç dayanımı bulguları Şekil 4.12’de verilmiştir.

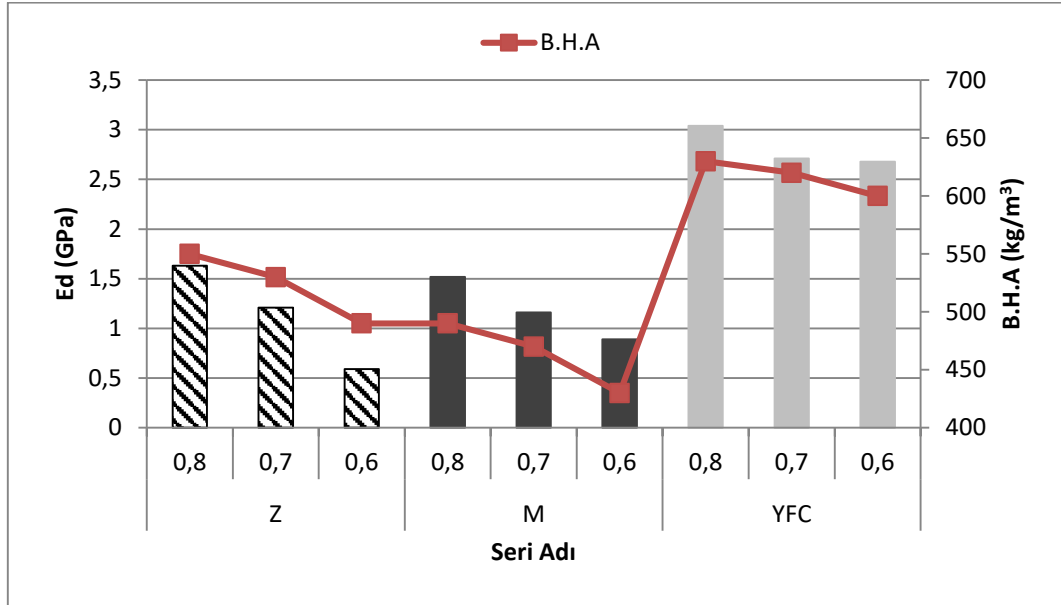


Şekil 4.12 Hammaddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı bulguları.

Serilerin basınç dayanımı değerleri incelendiğinde en düşük basınç dayanımı değerleri, zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerde bulunmuştur. En yüksek basınç dayanımı değerleri ise metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerde bulunmuştur. Zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 1,32 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde 0,82 MPa olarak bulunmuştur. Zeolit, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 2,13 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde ise 1,71 MPa olarak bulunmuştur. Metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri en yüksek çimento oranına sahip serilerde 2,37 MPa, en düşük çimento oranına sahip serilerde 1,82 MPa olarak bulunmuştur. Basınç dayanımı değerleri karşılaştırmalı olarak incelendiğinde akışkanlaştırıcı katkının, serilerin basınç dayanımı değerlerine pozitif yönde katkı sağladığı görülmüştür.

4.5 Dinamik Elastisite Modülü Bulguları

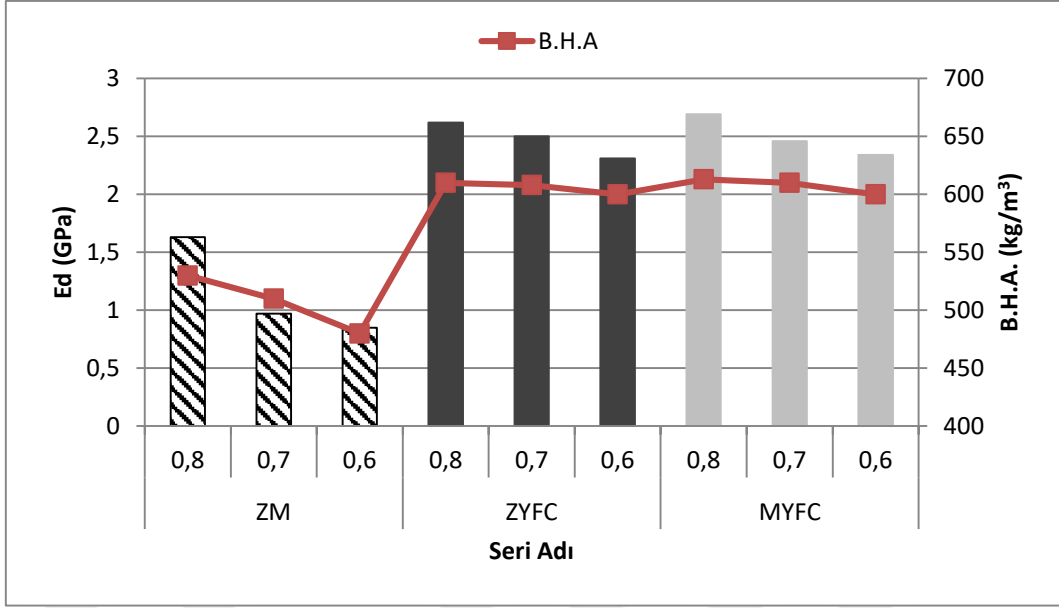
Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait dinamik elastisite modülü bulguları Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları.

Serilerin dinamik elastisite modülü değerleri incelendiğinde en yüksek değerler YFC ile üretilen serilerde bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan serilerde 3,04 GPa, çimento oranı en düşük olan serilerde ise 2,68 GPa olarak bulunmuştur. Zeolit ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan serilerde 1,63 GPa, çimento oranı en düşük olan serilerde 0,59 GPa olarak bulunmuştur. Metakaolin ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan serilerde 1,52 GPa, çimento oranı en düşük olan serilerde ise 0,89 GPa olarak bulunmuştur.

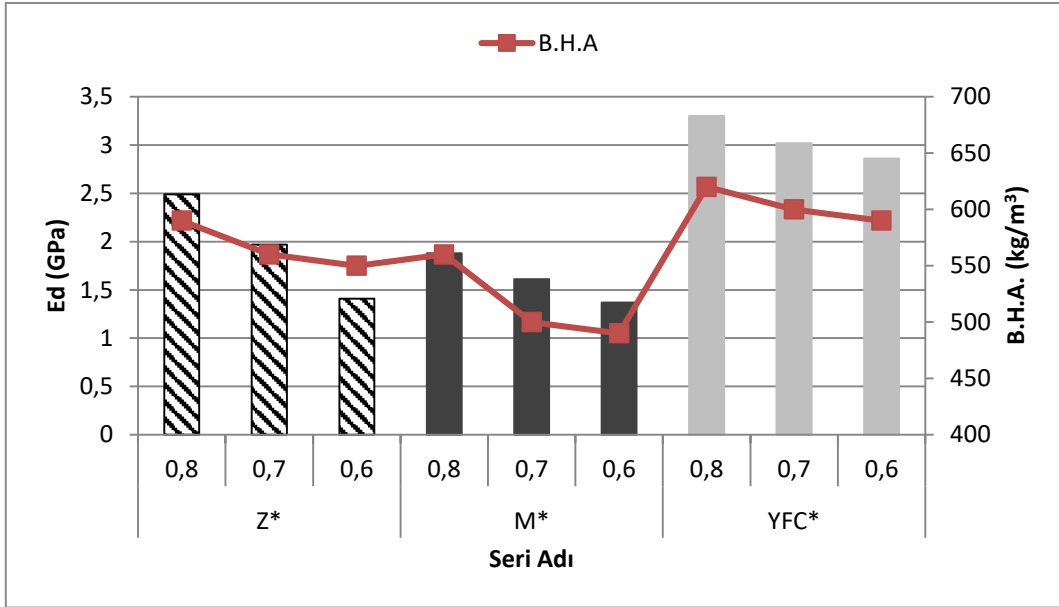
Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait dinamik elastisite modülü bulguları Şekil 4.14’de verilmiştir.



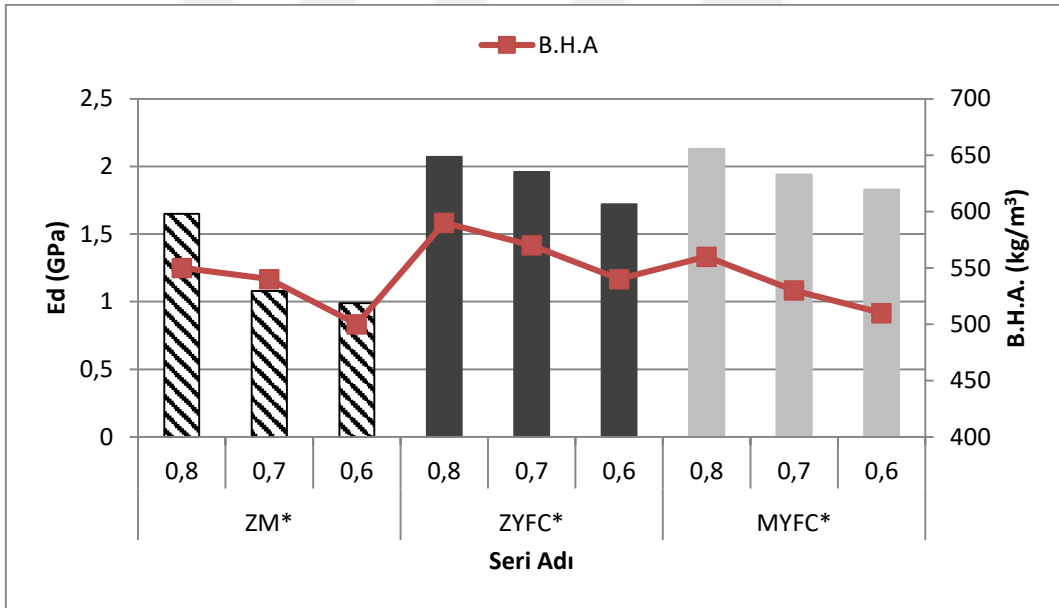
Şekil 4.14 Hammaddelerin karıştırılması ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları.

Serilerin dinamik elastisite modülü değerleri incelendiğinde en düşük değerler zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerde bulunmuştur. Metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, zeolit ve YFC ile üretilen serilere kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan seride 1,63 GPa, çimento oranı en düşük olan seride 0,85 GPa olarak bulunmuştur. Zeolit ve YFC ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, çimento oranı en yüksek olan seride 2,62 GPa, en düşük olan seride 2,31 GPa olarak bulunmuştur. Metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, çimento oranı en yüksek olan seride 2,69 GPa, çimento oranı en düşük olan seride ise 2,34 GPa olarak bulunmuştur. Dinamik elastisite modülü değerlerine bakarak serilerin durabiliteleri hakkında yorum yapılacak olursa metakaolin ve YFC ile üretilen seriler ile, zeolit ve YFC ile üretilen serilerin, zeolit ve metakaolin ile üretilen serilere göre dış ortam faktörlerine daha dayanıklı olarak kabul edilebileceği düşünülebilir.

Akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilere ait dinamik elastisite modülü bulguları Şekil 4.15’de, hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilere ait dinamik elastisite modülü bulguları ise Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.15 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları.



Şekil 4.16 Hammddelerin karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü bulguları.

Akışkanlaştırıcı katkı ile birlikte üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri incelendiğinde en yüksek değerler YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, en yüksek çimento oranına sahip seride 3,30 GPa, en düşük çimento oranına sahip seride 2,86 GPa olarak bulunmuştur. Zeolit ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, çimento oranı en yüksek olan

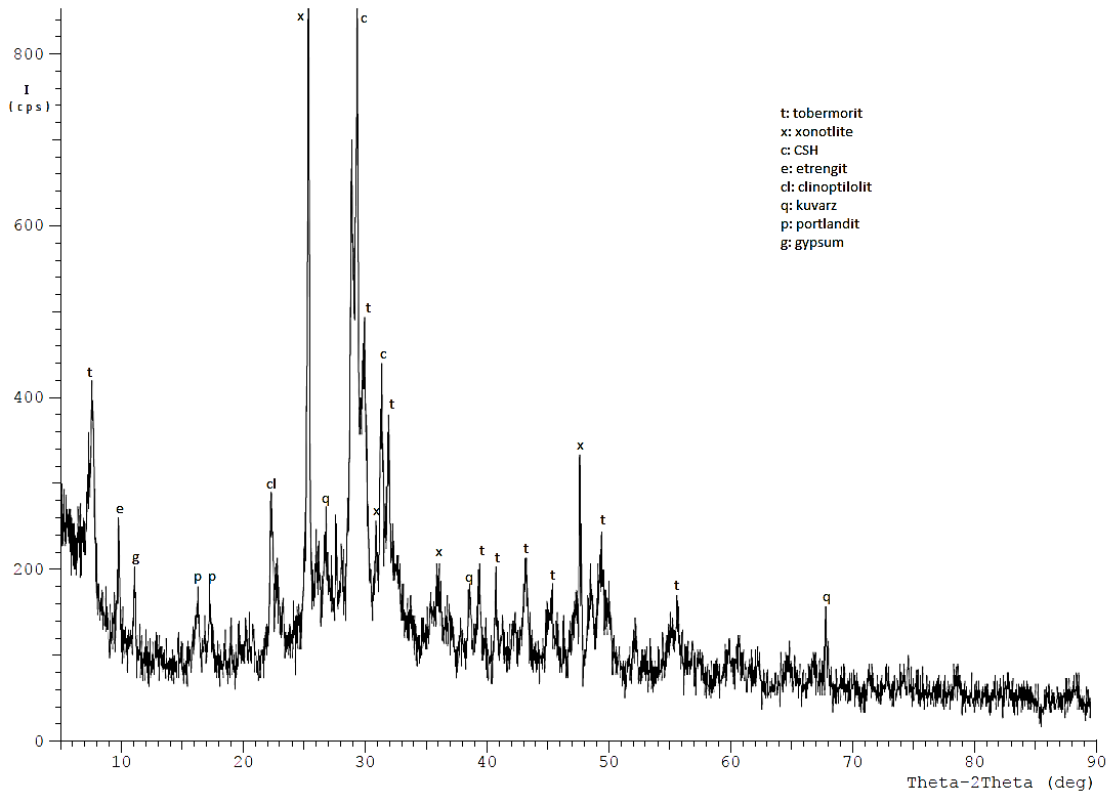
seride 2,49 GPa, çimento oranı en düşük olan seride 1,41 GPa olarak bulunmuştur. Metakaolin ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri, çimento oranı en yüksek olan seride 1,88 GPa, çimento oranı en düşük olan seride ise 1,37 GPa olarak bulunmuştur.

Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilmesiyle elde edilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri incelendiğinde en düşük dinamik elastisite modülü değerlerinin zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde olduğu bulunmuştur. Zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan seride 1,65 GPa, çimento oranı en düşük olan seride 0,99 GPa olarak bulunmuştur. Zeolit, YFC ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri çimento oranı en yüksek olan seride 2,07 GPa, çimento oranı en düşük olan seride 1,72 GPa olarak bulunmuştur. Metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin dinamik elastisite modülü değerleri en yüksek çimento oranına sahip olan seride 2,13 GPa, en düşük çimento oranına sahip olan seride ise 1,72 GPa olarak bulunmuştur.

Aguilar vd. (2013)'e göre hafif betonların dinamik elastisite modülleri $0,5 \text{ gr/cm}^3$ yoğunlukta $1,0 \text{ kN/mm}^2$ seviyelerinde olmalıdır. Düşük dinamik elastisite modülleri kuruma küçülmesinden kaynaklanan iç çatlakların varlığına işaret eder. Bu anlamda, üretilen deney örneklerinin dinamik elastisite modülleri literatürde belirtilen değerler ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca rötre bulguları sonucunda en yüksek değerlerin metakaolin ile üretilen serilerde, en düşük değerlerin YFC ile üretilen serilerde elde edilmesi dinamik elastisite modülü ve rötre arasındaki bu ilişkiyi doğrulamaktadır.

4.6 Mikroyapı Bulguları

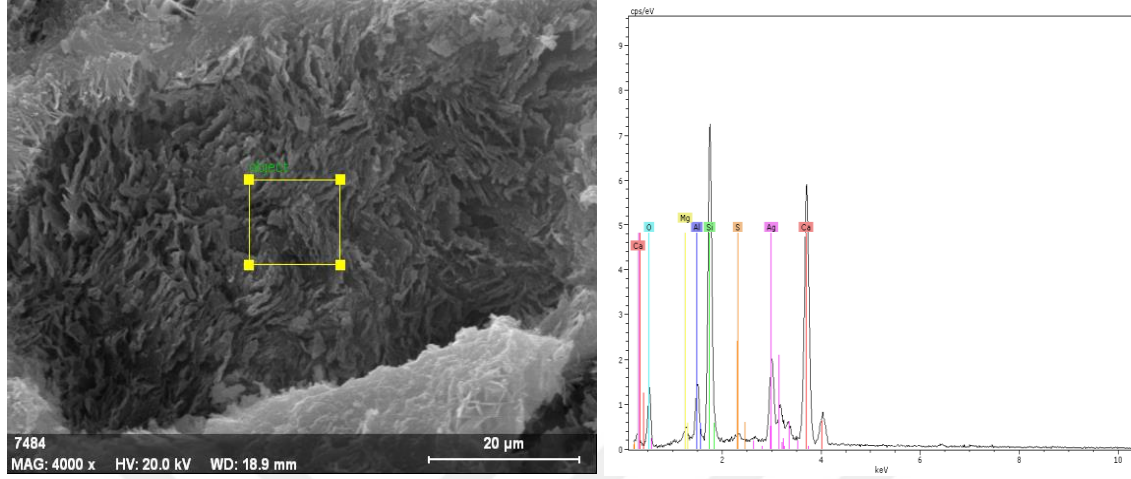
Zeolit ile üretilen örneğe ait XRD analizi Şekil 4.17’de verilmiştir. Zeolit ile üretilen örneğin kristal yapısında tobermorit, etrengit, xonotlite, clinoptilolite, kuvarz, CSH, portlandit yapıları gözlenmiştir.



Şekil 4.17 Zeolit ile üretilen örneğe ait XRD analizi.

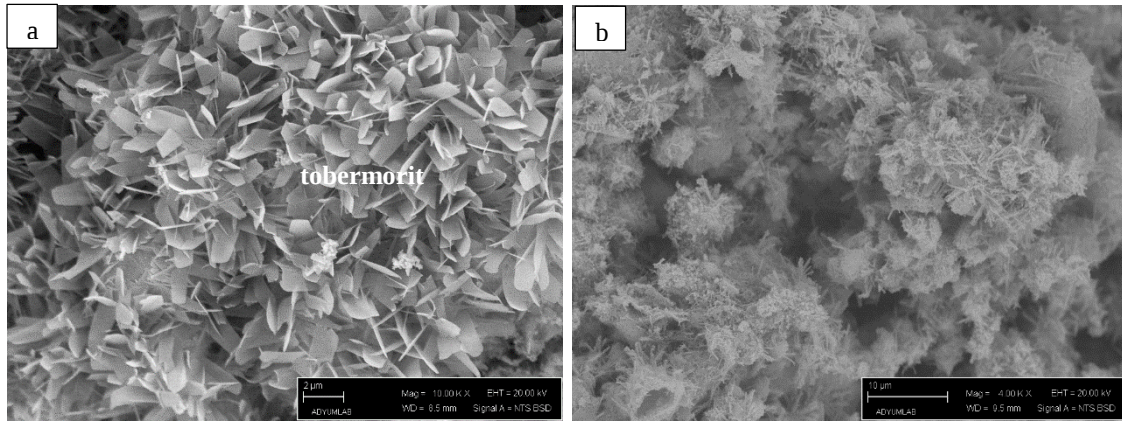
Zeolit ile üretilen örneğin kristal yapısında üretim sürecindeki kullanımdan kaynaklanan dihidrat halinde alçı tespit edilmiştir. Bununla birlikte iyi gelişmiş CSH yapısını yansıtan tobermorit fazının varlığı da tespit edilmiştir. Tobermorit fazının yoğunluğu 420 cps seviyelerindedir. Ayrıca analizde portlandit fazının varlığı dikkat çekicidir. Bu fazın, karışımdaki CaO’nin hidratasyonu ve çimento ana bileşenlerinden C₃S fazının erken dönemdeki hidratasyonu sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Tobermorit oluşumunun yanı sıra etrengit oluşumu da gözlenmiştir. Çimento içerisindeki ana bileşenlerden C₃A’nın reaksiyonu sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Etrengit erken dönemde dayanımda etkili olabilirken ileri yaşlardaki dayanım değerlerinde düşüşe sebep olabilir.

Şekil 4.18’de zeolit ile üretilen deney örneğine ait SEM-EDX analizinde, XRD analizinde belirlenen CSH yapısı görülmektedir.



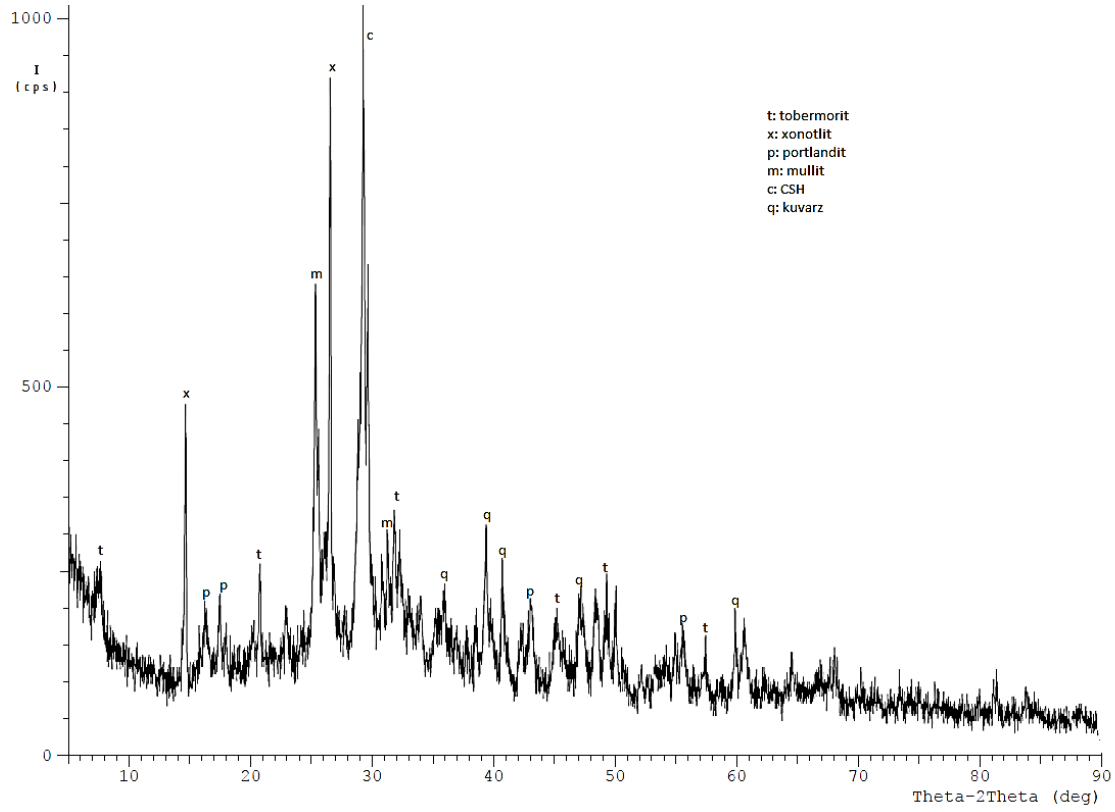
Şekil 4.18 Zeolit ile üretilen örneğe ait SEM-EDX analizi.

Şekil 4.19’da zeolit ile üretilen seride gözlemlenen tobermorit ve etrengit yapılarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. XRD analizinde belirlenen tobermorit pik yoğunluğunun tobermorit fazının plaka yapısının gelişimini doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

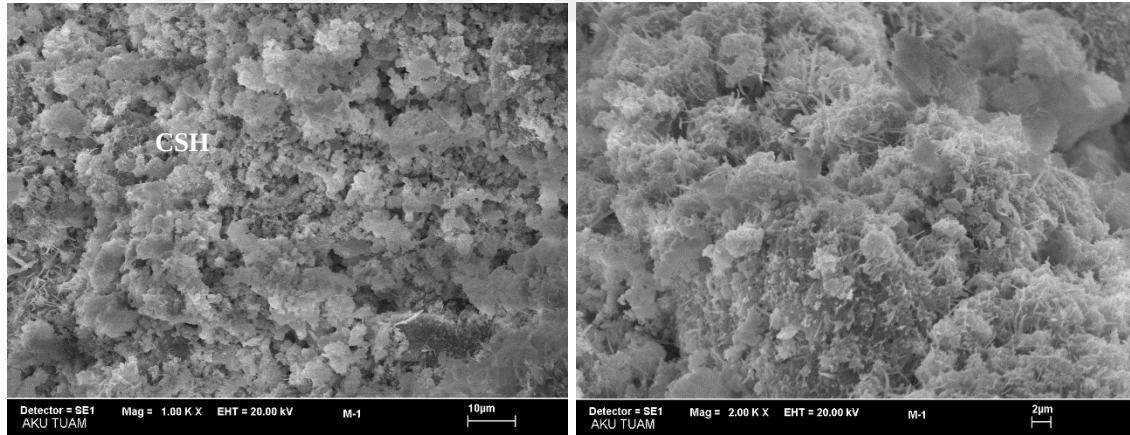


Şekil 4.19 Zeolit ile üretilen örnekte tobermorit (a) ve etrengit (b) oluşumları.

Metakaolin ile üretilen seriye ait XRD analizi Şekil 4.20’de verilmiştir. Örneğin mineral yapısında CSH, xonotlit, portlandit, mullit ve kuvarz mineral fazları bulunmuştur. Metakaolin ile üretilen serideki tobermorit pik yoğunluğu zeolit ile üretilen seriye göre daha düşük seviyelerdedir. Tobermorit yoğunluğunun 250 cps seviyelerinde olduğu görülmektedir.



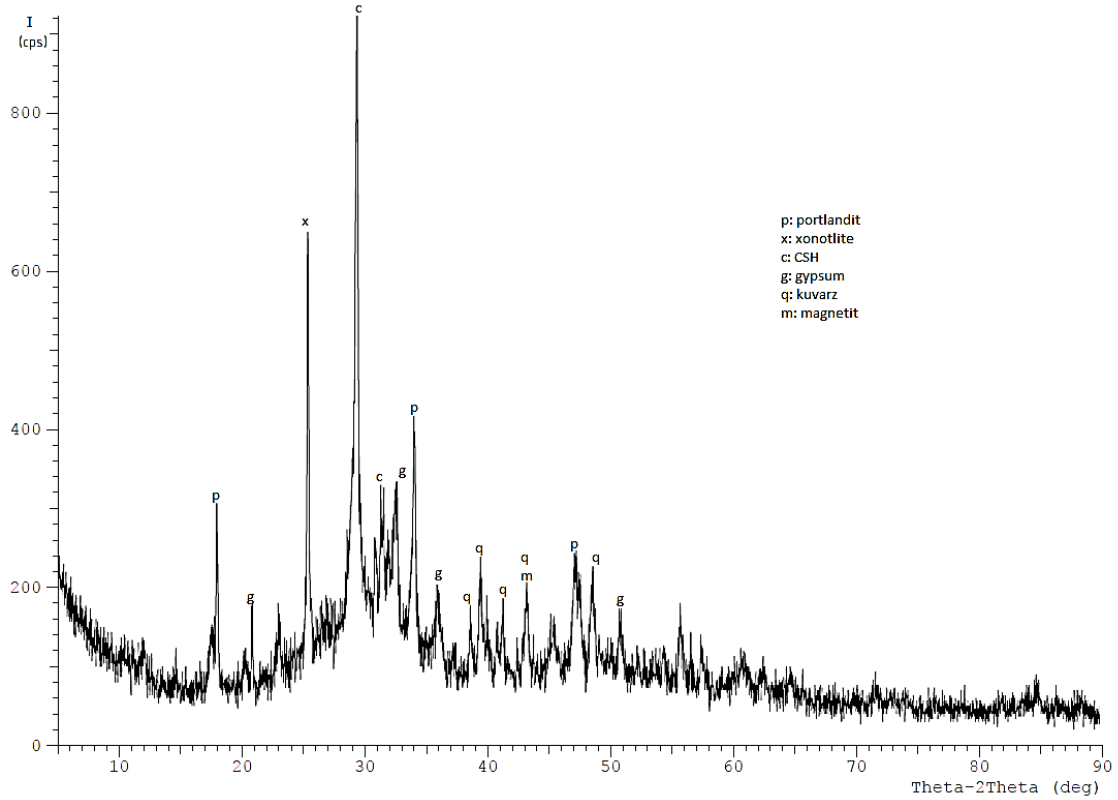
Şekil 4.20 Metakaolin ile üretilen örneğe ait XRD analizi.



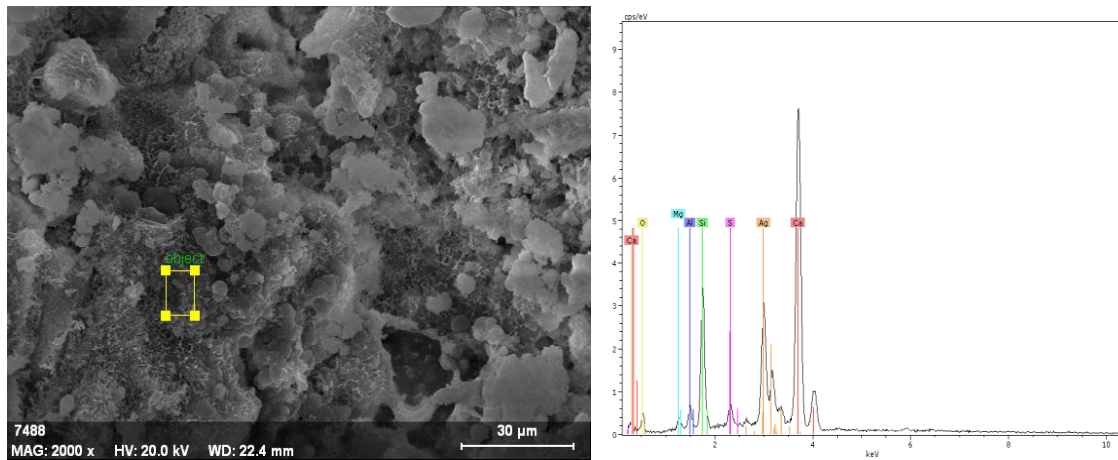
Şekil 4.21 Metakaolin ile üretilen örneğe ait SEM görüntüleri.

Şekil 4.21’de metakaolin ile üretilen örneğe ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinde yoğun CSH jel yapısı içinde oluşmaya başlamış tobermorit plakaları gözlenmektedir. Metakaolin ile üretilen örneklerin dayanım değerlerinin zeolit ile üretilen örneğe göre daha yüksek çıkmasının sebebinin CSH jel yapısının daha yoğun olarak bulunmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Yüksek fırın cürufu ile üretilen örneğe ait XRD analizi Şekil 4.22’de verilmiştir. Örneğin mineralojik incelemesi sonucu yapısında portlandit, xonotlit, CSH, gypsum, kuvarz ve magnetit fazları bulunmuştur. Yoğun CSH yapısına ait SEM-EDX analizi Şekil 4.23’de verilmiştir. Diğer serilerde gözlenen tobermorit fazı bulunmamıştır. Portlandit fazının varlığı ortamda serbest kirecin varlığını göstermektedir.

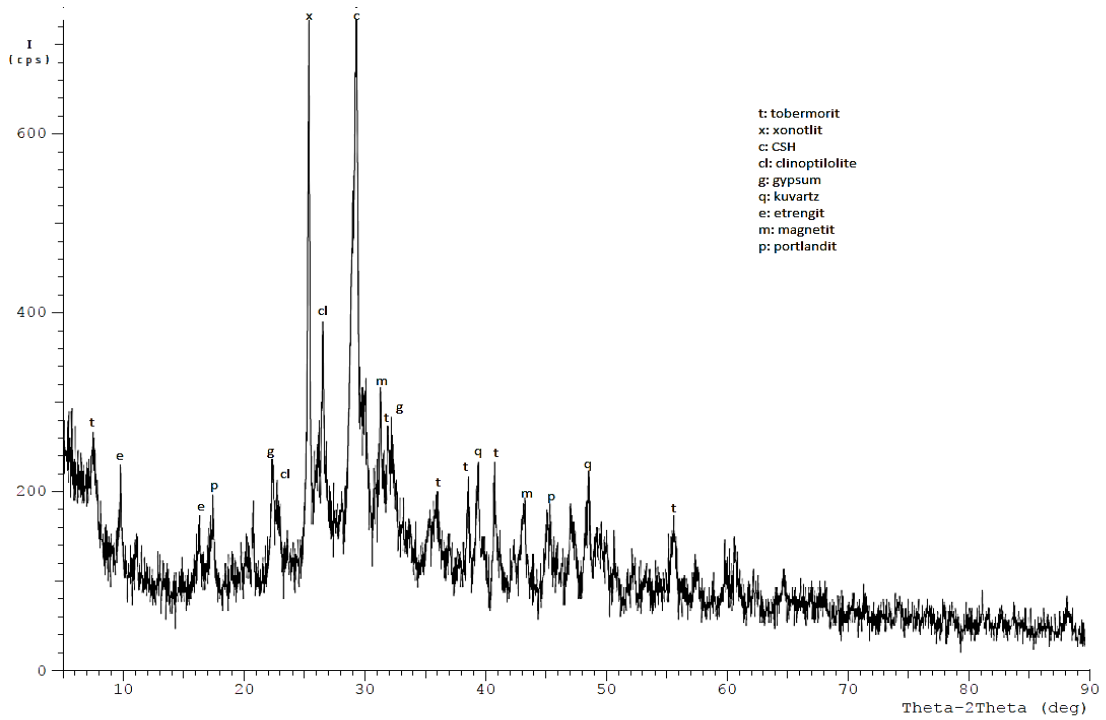


Şekil 4.22 YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi.

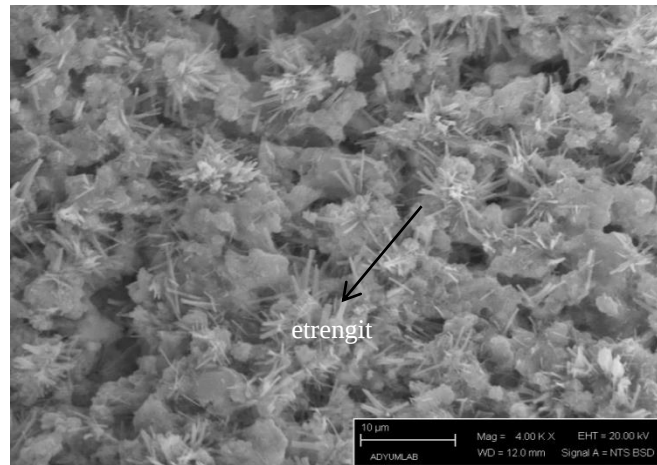


Şekil 4.23 YFC ile üretilen örneğe ait SEM-EDX analizi.

Zeolit ve metakaolin ile üretilen örneğe ait XRD analizi Şekil 4.24’de verilmiştir. Zeolit ve metakaolin ile üretilen örneğin mineralojik yapısında tobermorit, xonotlit, CSH, clinoptilolit, dihirat alçı (gypsum), kuvarz, etrengit, portlandit, magnetit fazları bulunmuştur. Tobermorit faz yoğunluğu 280 cps seviyelerindedir. Sülfat içerikli bileşikler ve C_3A fazının reaksiyonu sonucu etrengit fazı oluşur (Şekil 4.25). Portlandit fazının varlığı karışımda bulunan CaO ve çimento ana bileşenlerinden C_3S ’in hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ’ın varlığı şeklinde açıklanabilir.

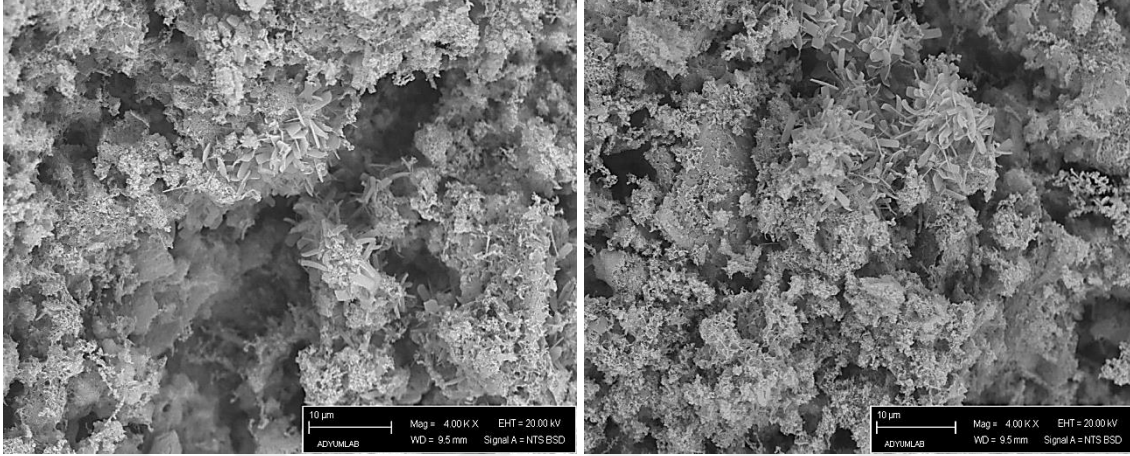


Şekil 4.24 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örneğe ait XRD analizi.



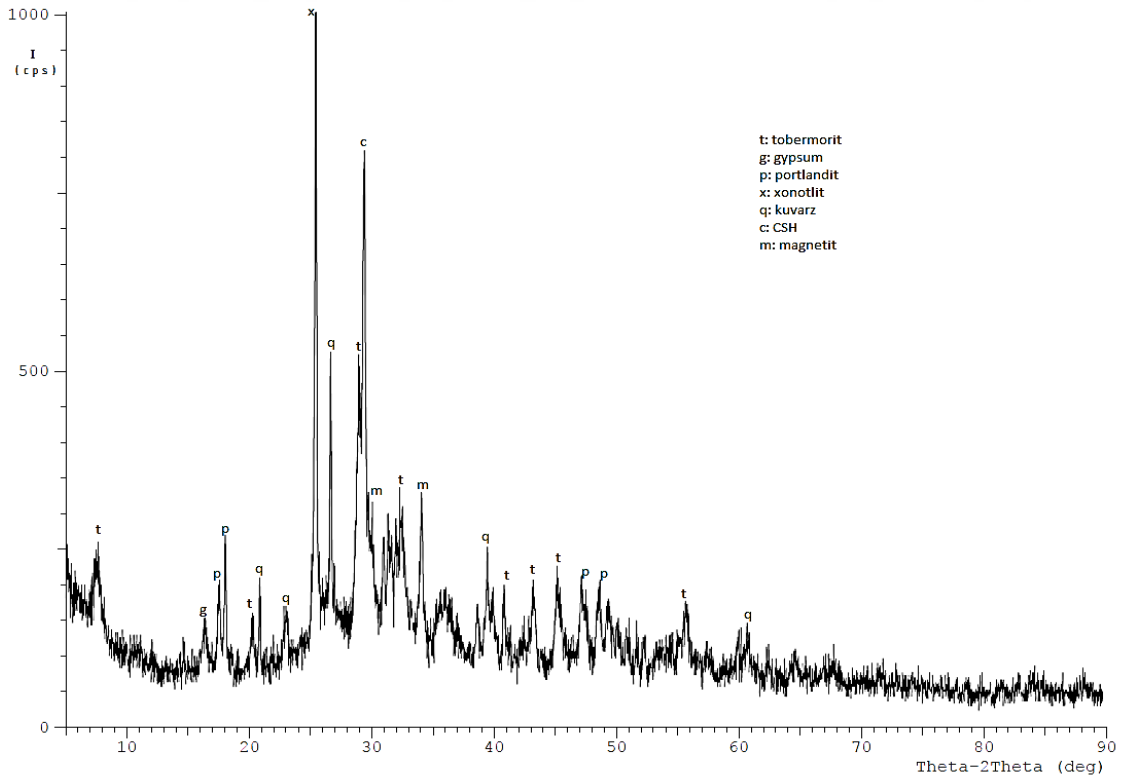
Şekil 4.25 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örnekte etrengit oluşumu.

Zeolit ve metakaolin ile üretilen örnekteki tobermorit oluşumları Şekil 4.26’da verilmiştir.



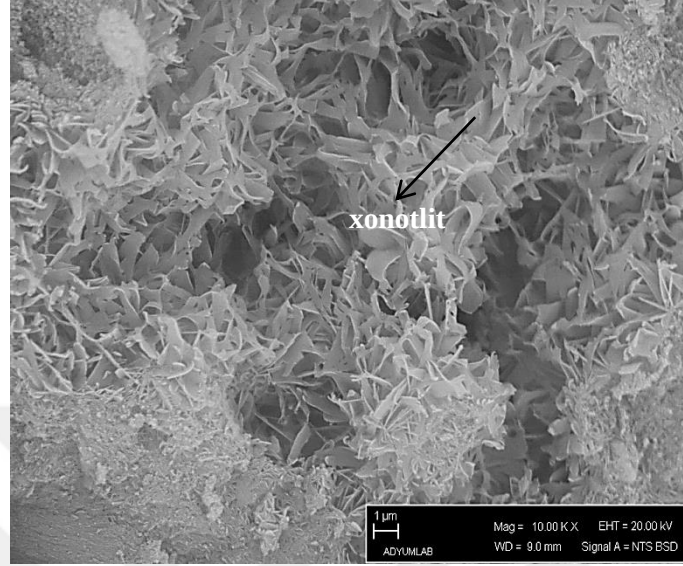
Şekil 4.26 Zeolit ve metakaolin ile üretilen örnekte tobermorit oluşumları.

Metakaolin ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi Şekil 4.27’de verilmiştir. Örneğin mineralojik analizinde tobermorit, xonotlit, portlandit, magnetit, CSH, kuvarz mineralleri bulunmuştur.



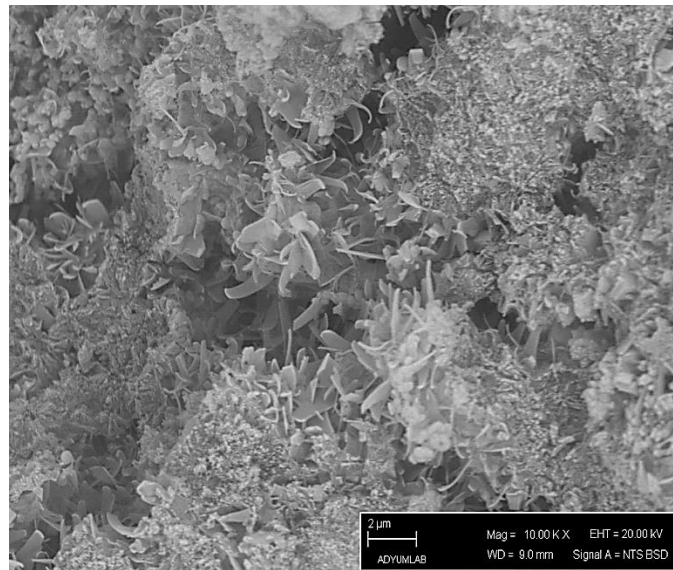
Şekil 4.27 Metakaolin ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi.

XRD analizi sonucu karışımda en fazla yoğunluğa sahip xonotlit fazına ilişkin SEM görüntüsü Şekil 4.28’de verilmiştir.



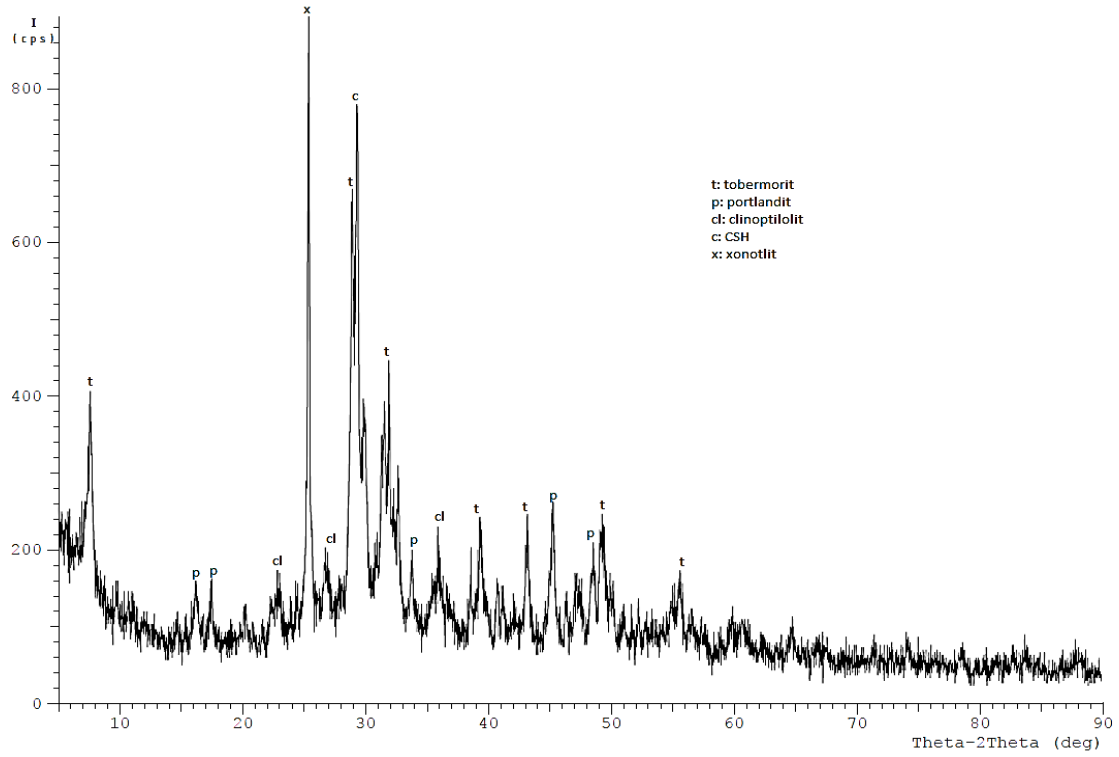
Şekil 4.28 Metakaolin ve YFC ile üretilen örnekte xonotlit oluşumu.

Tobermorit faz yoğunluğu 250 cps seviyelerindedir. Tobermorit oluşumlarına ilişkin SEM görüntüsü Şekil 4.29’da verilmiştir. Portlandit fazının varlığı iç yapıda serbest kireç varlığını göstermektedir. Tobermorit yoğunluğunun düşük seviyelerde kalmasının sebebinin sistemde var olan silikat kaynaklarının kireç ile yeteri kadar reaksiyona girmediklerinin göstergesi olarak söylenebilir.



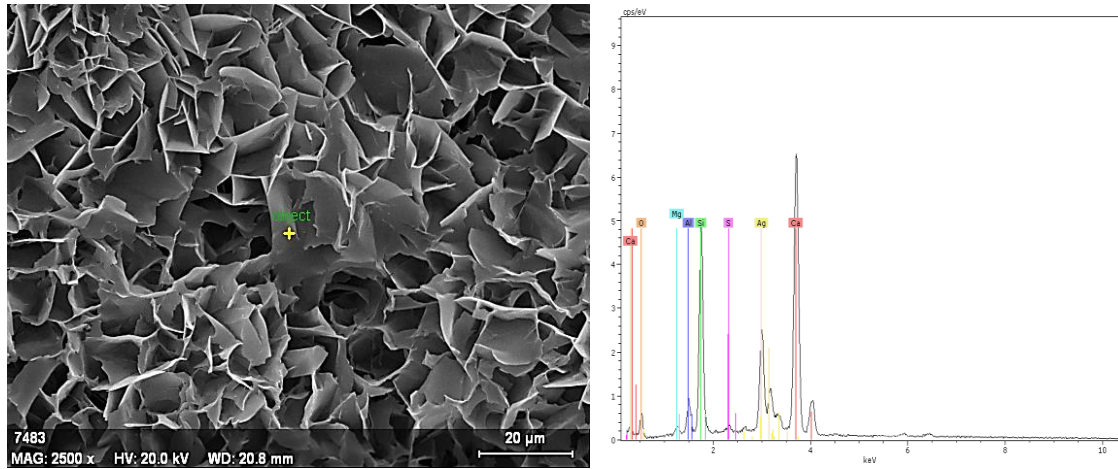
Şekil 4.29 Metakaolin ve YFC ile üretilen örnekte tobermorit oluşumu.

Zeolit ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi Şekil 4.30’da verilmiştir. Örneğin mineralojik incelemesinde tobermorit, xonotlit, portlandit, clinoptilolit fazları bulunmuştur.



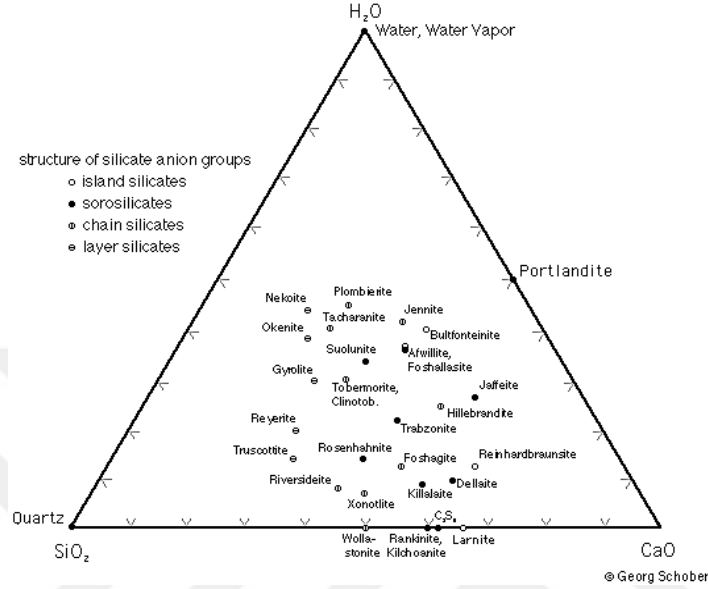
Şekil 4.30 Zeolit ve YFC ile üretilen örneğe ait XRD analizi.

Tobermorit fazının yoğunluğu 420 cps seviyelerindedir. En fazla yoğunluğa sahip pikler ise xonotlit ve CSH fazlarıdır. Xonotlit fazına ilişkin SEM-EDX incelemesi Şekil 4.31’de verilmiştir.



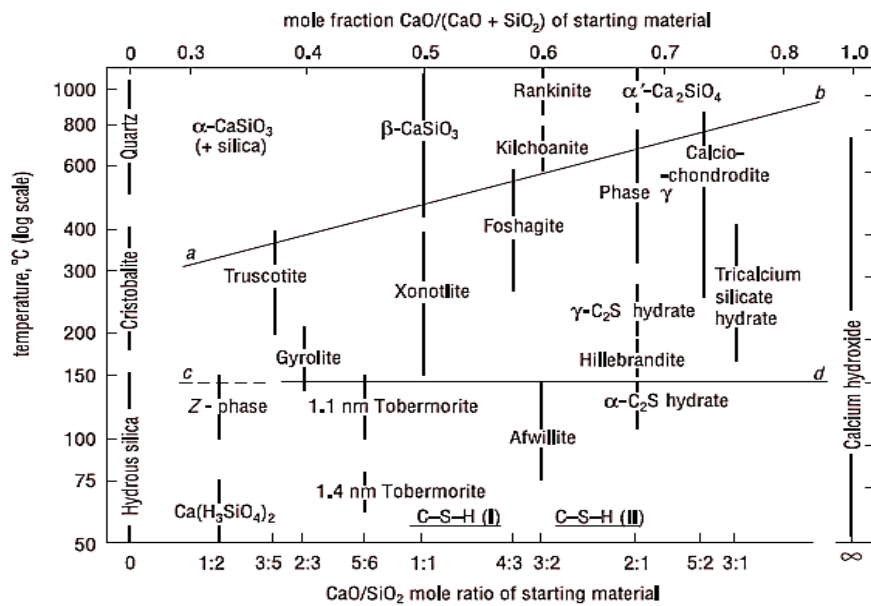
Şekil 4.31 Xonotlit fazına ait SEM-EDX görüntüsü.

Şekil 4.32’de verilen diyagram incelendiğinde örneklere uygulanan 8 saat süreli otoklav kürü işleminde başlıca tobermorit, CSH (I) ve diğer C-S-H kristal fazlarının bulunması beklenmektedir. Deney örneklerinin analiz edilen kristal yapıları bu diyagramla karşılaştırıldığında, benzer faz yapılarına rastlanıldığı gözlenmiştir.



Şekil 4.32 Kristal C-S-H fazları ve CaO-SiO₂-H₂O sisteminde gösterimi (İnt. Kyn. 4).

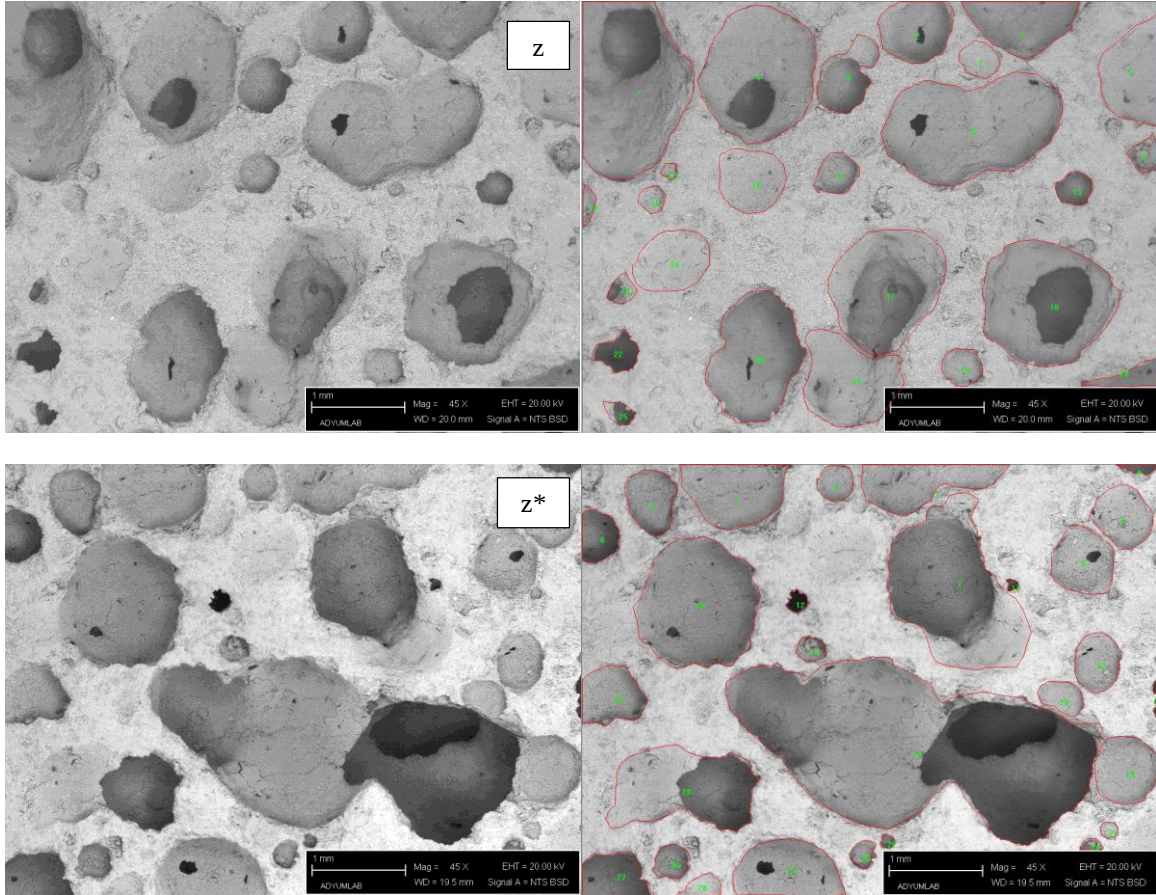
Şekil 4.33’de sıcaklık ve CaO/SiO₂ mol oranına göre oluşacak fazların kararlılık sınırları verilmiştir. Xonotlit varlığının tobermorit fazı ile komşuluğu XRD analizlerindeki xonotlit varlığını açıklamaktadır.



Şekil 4.33 Değişen sıcaklıklarda C-S-H fazlarının kararlılık sınırları (Kurdowski 2014).

4.7 Makroyapı Bulguları

Makroyapı çalışmalarında bulgular boşlukların maksimum ve minimum çapları, ortalama çapları, maksimum ve minimum genişlikleri ile sınırlı tutulmuştur. Zeolit ile üretilen örneklere ilişkin makroyapı resimleri Resim 4.1 ve makroyapıya ilişkin veriler Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Resim 4.1 Zeolit ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi.

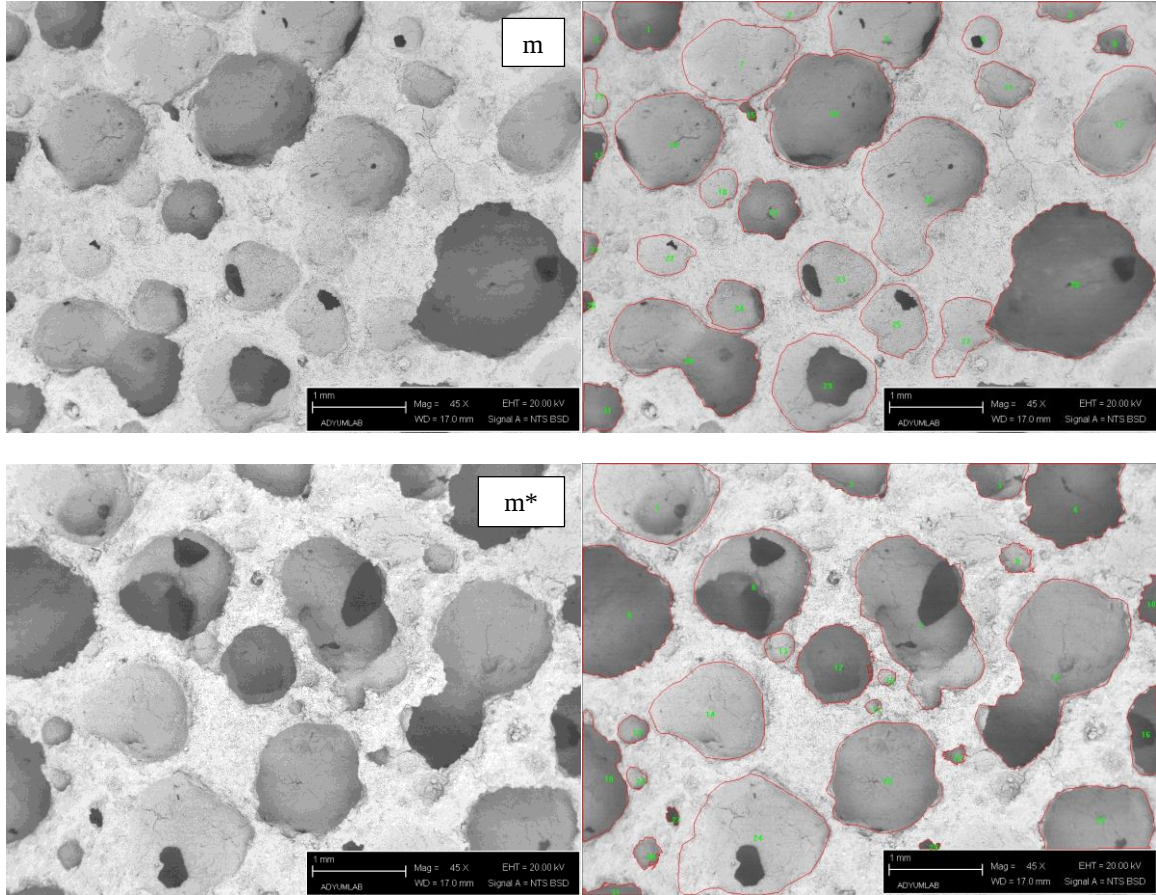
Çizelge 4.3 Zeolit ile üretilen örneklere ait makroyapı bulguları.

	Mak. Çap (mm)	Min. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)
Z	0,63	0,29	0,47	0,93	0,38
Z*	0,83	0,44	0,60	0,85	0,49

Zeolit ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 0,63 mm, minimum çap ortalaması 0,29 mm, çapların ortalaması 0,47 mm, uzunluk ortalaması 0,93 mm ve genişlik ortalaması 0,38 mm olarak bulunmuştur. Zeolit ve akışkanlaştırıcı

ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 0,83 mm, minimum çap ortalaması 0,44 mm, çapların ortalaması 0,60 mm, uzunluk ortalaması 0,85 mm ve genişlik ortalaması 0,49 mm olarak bulunmuştur.

Metakaolin ile üretilen örneklere ait makroyapı resimleri Resim 4.2’de ve makroyapıya ilişkin veriler Çizelge 4.4’de verilmiştir.



Resim 4.2 Metakaolin ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi.

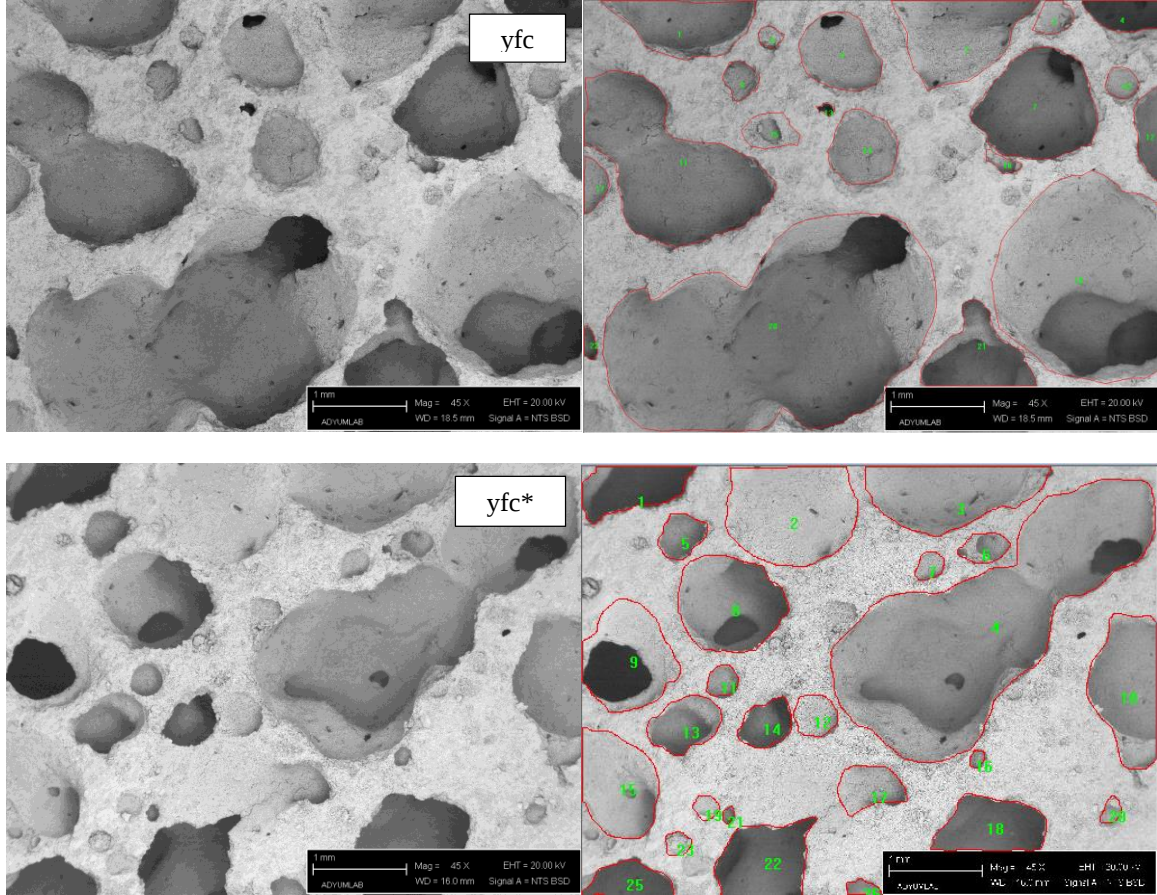
Çizelge 4.4 Metakaolin ile üretilen örneklere ait makroyapı bulguları.

	Mak. Çap (mm)	Min. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)
M	0,68	0,45	0,56	0,65	0,49
M*	0,87	0,30	0,52	0,86	0,42

Metakaolin ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 0,68 mm, minimum çap ortalaması 0,45 mm, çapların ortalaması 0,56 mm, uzunluk ortalaması 0,65 mm ve genişlik ortalaması 0,49 mm olarak bulunmuştur. Metakaolin ve

akışkanlaştırıcı ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 0,87 mm, minimum çap ortalaması 0,30 mm, çapların ortalaması 0,52 mm uzunluk ortalaması 0,86 mm ve genişlik ortalaması 0,42 mm olarak bulunmuştur.

Yüksek fırın cürudu ile üretilen örneğe ait makroyapı resimleri Resim 4.3’de ve makroyapıya ilişkin veriler Çizelge 4.5’de verilmiştir.



Resim 4.3 YFC ile üretilen örneklere ait makroyapı resmi.

Çizelge 4.5 YFC ile üretilen örneklere ait makroyapı bulguları.

	Mak. Çap (mm)	Min. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)
YFC	1,18	0,69	0,90	1,16	0,72
YFC*	1,10	0,56	0,76	1,10	0,67

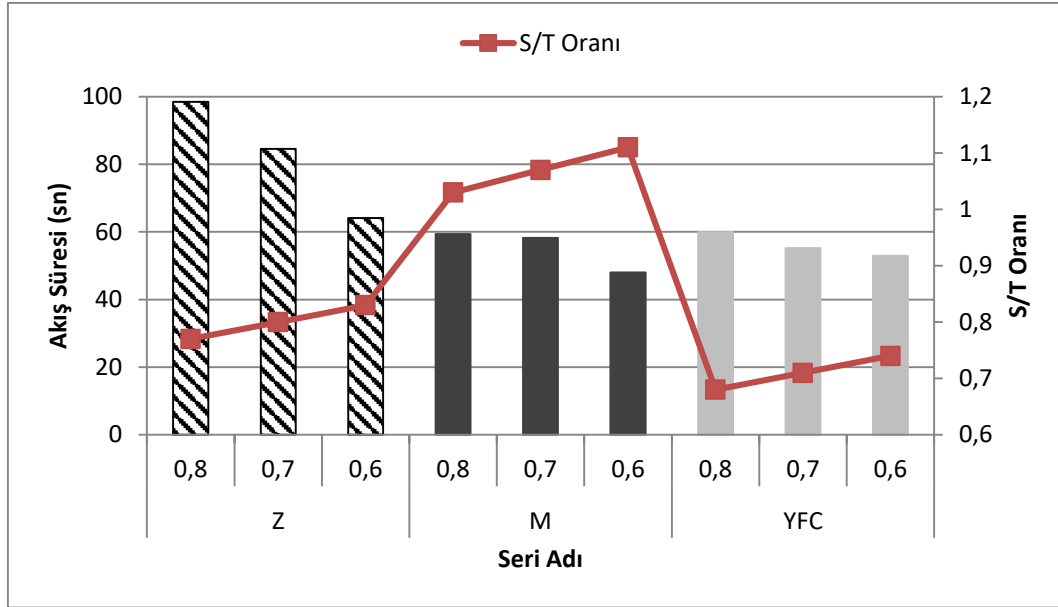
Yüksek fırın cürufu ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 1,18 mm, minimum çap ortalaması 0,69 mm, çapların ortalaması 0,90 mm, uzunluk

ortalaması 1,16 mm ve genişlik ortalaması 0,72 mm olarak bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı ile üretilen örnekte, gözenek çaplarının maksimum çap ortalaması 1,10 mm, minimum çap ortalaması 0,56 mm, çapların ortalaması 0,76 mm uzunluk ortalaması 1,10 mm ve genişlik ortalaması 0,67 mm olarak bulunmuştur.

Borhan (1988) ve Narayanan and Ramamurthy (2000) gazbetonların gözenek çaplarının 0,5mm ile 1,5mm arasında olduğunu belirtilmektedirler. Yapılan makroyapı çalışmaları sonucunda üretilen deney örneklerinin gözenek yapılarının literatürde belirtilen bu değerlerle benzer olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin gözenek yapıları SEM’de büyük görüntülemelerde incelendiğinde, en iyi gözenek oluşumunun metakaolin ile üretilen serilerde olduğu düşünülmektedir. Metakaolin ile üretilen serilerin gözenek yapıları küresel ve eşeksenli gözenek yapısına daha yakınken, YFC ve zeolit ile üretilen serilerin gözenek yapılarının küresel şekilden uzaklaşarak silindirik bir yapıya daha yakın halde olup eşeksenli gözenek yapısından uzaklaştıkları tespit edilmiştir. Makroyapı fotoğraflarından, gözeneklerin küresel bir gözenek geometrisiyle silindirik bir geometrik yapı arasında değiştiği ve boşlukların kesinlikle çok düzgün oluşmadığı söylenebilir. Gözeneklerin kapalı gözenek olduğunu söylemek yapılan incelemelere göre biraz zor olabilir. Çünkü yer yer gözenekler arasında yırtıkların (boşlukların) olduğu görülebilmektedir. Ayrıca akışkanlaştırıcı katkının serilerin gözenek oluşumlarında spesifik bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir.

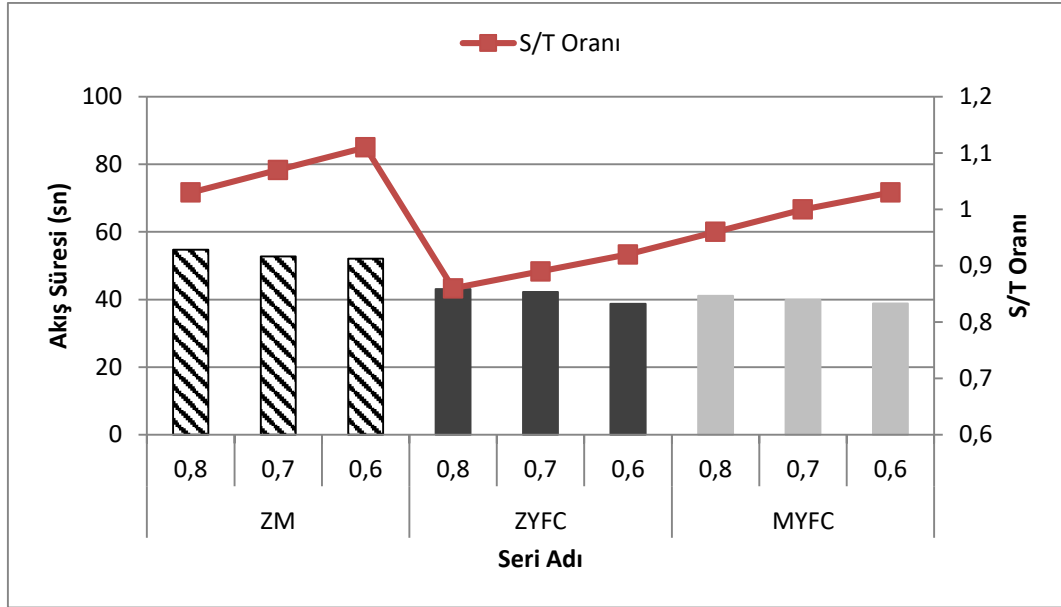
4.8 Akışkanlık Bulguları

Bu bölümde farklı karışım oranlarında üretilen deney örneklerinden Marsh hunisi metodu ile elde edilen akışkanlık bulgularına yer verilmiştir. Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait akışkanlık bulguları Şekil 4.34’de verilmiştir.



Şekil 4.34 Zeolit, metakaolin ve YFC ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği.

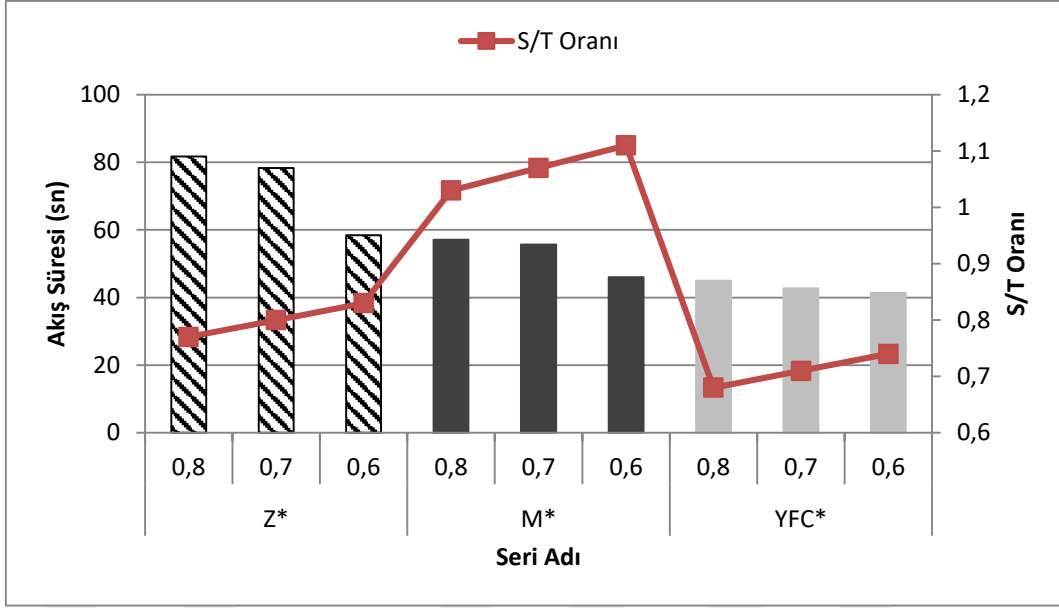
Zeolit ile üretilen serilerin akışkanlık bulguları incelendiğinde karışımdaki çimento oranının azalması ile birlikte karışımdaki S/T oranının artışı akış sürelerinde düşüş gerçekleşmesine sebep olmuştur. Karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 98,46sn, 0,7 olan seride 84,52sn, 0,6 olan seride ise 64,09sn olarak ölçülmüştür. Mohammed (2011) 'in belirttiği değerlendirmeye göre zeolit ile üretilen serilerin akışkanlıkları kesikli akışkan sınıfında yer almaktadır. Metakaolin ile üretilen serilerin akışkanlık bulguları incelendiğinde karışımdaki çimento oranının azalmasıyla birlikte akış süreleri kısalmıştır. Karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 59,37sn, 0,7 olan seride 58,23sn, 0,6 olan seride ise 48,03sn olarak ölçülmüştür. Metakaolin ile üretilen tüm serilerin akışkanlıkları 60 sn'nin altında olduğu için akışkan sınıfta yer almaktadırlar. Yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerin akışkanlık ölçümleri değerlerindirildiğinde, karışımdaki çimento 0,8 olan seride akış süresi 56,96sn, 0,7 olan seride 58,23sn ve 0,6 olan seride ise 52,96sn olarak ölçülmüştür. Yüksek fırın cürufu ile üretilen tüm seriler akışkan sınıftadır. Tüm seriler birbiri arasında karşılaştırıldığında en akışkan seriler YFC ile üretilen seriler olup, zeolit ile üretilen serilerin kıvamlarının metakaolin ve YFC ile üretilen serilere göre daha düşük akışkanlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait akışkanlık bulguları Şekil 4.35'de verilmiştir.



Şekil 4.35 Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği.

Zeolit ve metakaolin ile üretilen serilerin akışkanlık bulguları incelendiğinde karışımdaki çimento oranının azalması ile birlikte akış sürelerinde düşüş gerçekleşmiştir. Karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 54,77sn, 0,7 olan seride 52,76sn, 0,6 olan seride ise 52,12sn olarak ölçülmüştür. Zeolit ve YFC ile üretilen serilerin akış süreleri incelendiğinde, karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride 43,12sn, 0,7 olan seride 42,23sn, 0,6 olan seride ise 38,78 sn olarak ölçülmüştür. Metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin akış süreleri incelendiğinde, karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 41,07sn, 0,7 olan seride 39,91sn, 0,6 olan seride ise 38,88 sn olarak ölçülmüştür. Hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması akış süreleri olumlu etkilemiştir. En düşük akış süreleri metakaolin ve YFC ile üretilen serilerde bulunmuştur. Karışımdaki zeolit miktarının azaltılması ve yerine metakaolin ve YFC kullanılması ile birlikte akış süreleri 60sn'lik sınır değerin altına inmiştir.

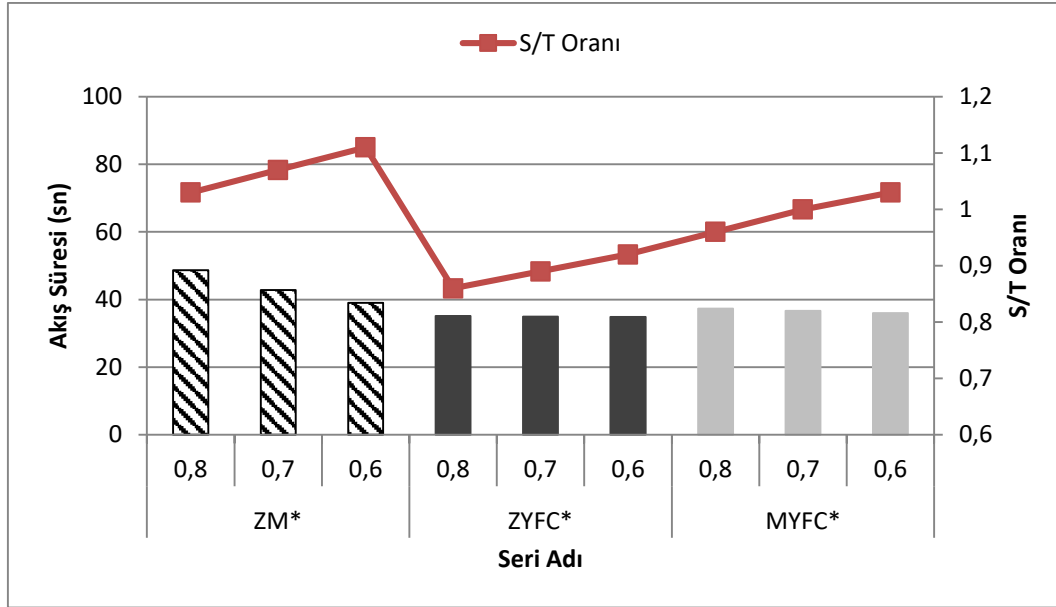
Akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile üretilen serilere ait akışkanlık bulguları Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36 Zeolit, metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği.

Zeolit ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerin akış süreleri incelendiğinde karışımdaki çimento oranının azalması ile birlikte akış süresinde düşüş gerçekleşmiştir. Karışımdaki 0,8 çimento oranına sahip seride akış süresi 81,68sn, çimento oranı 0,7 olan seride 78,33sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 58,42sn olarak ölçülmüştür. Akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile zeolit ile üretilen serilerin akışkanlık özelliklerinde, katkısız serilere göre iyileşme görülmüştür. Metakaolin ve akışkanlaştırıcı katkı ile üretilen serilerde çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 57,08sn, çimento oranı 0,7 olan seride 55,73sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 46,06sn olarak ölçülmüştür. Yüksek fırın cürufu ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 45sn, çimento oranı 0,7 olan seride 42,75sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 41,44sn olarak ölçülmüştür. En düşük akış süreleri YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerde gözlenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile birlikte, tüm serilerin akış sürelerinde kısalma gerçekleşmiştir.

Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı katkı ilavesi ile birlikte üretilen serilere ait akışkanlık bulguları Şekil 4.37’de verilmiştir.



Şekil 4.37 Hammaddelerin birbiri arasında karıştırılması ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait akışkanlık grafiği.

Zeolit, metakaolin ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilere ait akışkanlık bulguları incelendiğinde, karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 48,67sn, çimento oranı 0,7 olan seride 42,85sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 39,07sn olarak ölçülmüştür. Zeolit, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin akışkanlık bulguları incelendiğinde, karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 35,11sn, çimento oranı 0,7 olan seride 34,98sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 34,89sn olarak ölçülmüştür. Metakaolin, YFC ve akışkanlaştırıcı ile üretilen serilerin akışkanlık bulguları incelendiğinde, karışımdaki çimento oranı 0,8 olan seride akış süresi 37,36sn, çimento oranı 0,7 olan seride 36,69sn ve çimento oranı 0,6 olan seride 36,04sn olarak ölçülmüştür.

Tüm serilerde karışım oranlarındaki çimento miktarının azaltılması ile birlikte S/T oranının artışı karışımların marsh hunisi akış sürelerini kısaltmıştır. Metakaolin ve YFC'nin dane çaplarının zeolite göre daha küçük olması ve akışkanlaştırıcı katkının ince taneler üzerinde etkisinin daha fazla olması, metakaolin ve YFC ile üretilen serilerin marsh hunisi akış sürelerinin daha kısa olmasına sebep olarak gösterilebilir.

Karışımlara akışkanlaştırıcı madde ilave edildiğinde çimento tanecikleri tarafından adsorbe edilerek negatif yüklü katkı partikülleriyle birleşirler ve aynı yüklü

olduklarından birbirlerini iterler. Katkının defloküller etkisi sonunda çimento flokülleşmesi önlenmekte ve açığa su çıkmaktadır (Shetty 2005). Bu maddelerin topaklaşmayı önlemeleri ve aynı zamanda tanelerin birbiri üzerinde kaymalarını kolaylaştırarak yağlayıcı etki göstermeleri iç sürtünmeyi azaltmış ve karışımların işlenebilirliği artmış, marsh hunisi akış süreleri ise kısalmıştır.

4.9 Rötre Bulguları

Bu bölümde, tüm karışımlar arasından seçilen örneklere ait rötre bulgularına yer verilmiştir. Karışımlara ait bilgiler Çizelge 4.6’da verilmiştir. Rötre ölçümleri, örneklerin otoklav öncesi ve otoklav sonrası boy okumaları arasındaki boy farkı dikkate alınarak hesaplanmıştır (Resim 4.4).

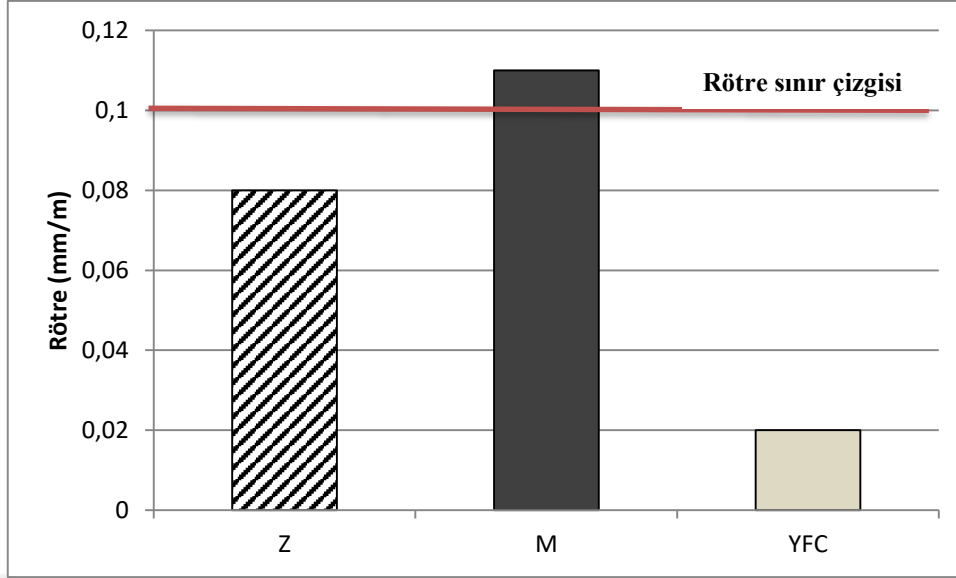


Resim 4.4 Rötre ölçüm çubukları ve komparatör.

Örneklere ait rötre (kuruma küçülmesi) verileri Şekil 4.38’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Rötre ölçümü yapılan serilerin karışım oranları.

Seri Adı	Zeolit	Metakaolin	YFC	Alçı	Sönmemiş Kireç	S/Ç	S/T	B.H.A (kg/m ³)
Z	1,5	-	-	0,3	0,3	2,81	0,77	550
M	-	1,5	-	0,3	0,3	3,75	1,03	490
YFC	-	-	1,5	0,3	0,3	2,50	0,68	630



Şekil 4.38 Örneklere ait rötre verileri grafiği.

Literatürde rötre (kuruma küçülmesi) değerleri 0,1 ile 0,2 mm/m arasında değişmektedir (İnt. Kyn. 5). Buna göre zeolit ve YFC ile üretilen örneklerin rötre değerleri literatür değerlerinin altında kalırken, metakaolin ile üretilen örnekler literatürde belirtilen sınır değerlerdedir. En en küçük rötre değeri YFC ile üretilen örneklerde 0,02 mm/m oranında gerçekleşirken, en büyük rötre değeri metakaolin ile üretilen örneklerde 0,11 mm/m oranında gerçekleşmiştir. Zeolit ile üretilen örneklerde gerçekleşen rötre değeri ise 0,08 mm/m oranındadır.

Rötre değerlerinde en önemli etkenlerden birisi kullanılan hammaddelerin özgül yüzey alanı değerleridir. Özgül yüzey alanının artması daha fazla büzölmeye neden olur ve çatlamaya eğilimi artırır (Brandt 2009). Kullanılan hammaddelerin özgül yüzey alanları incelendiğinde en yüksek değer metakaoline ait olup en düşük değer YFC'ye aittir. Elde edilen rötre bulguları özgül yüzey alanı değerleri ile karşılaştırıldığında varolan bu ilişkiyi doğrulamaktadır.

4.10 Isı İletkenlik Katsayısı Bulguları

Bu bölümde belirlenen örnekler üzerinde gerçekleştirilen ısı iletkenlik katsayısı ölçümlerine yer verilmiştir.

Örneklere ait karışım oranları, basınç dayanımı değerleri ve B.H.A bulguları Çizelge 4.7’de verilmiştir. Örneklerin ısı iletkenlik katsayıları İzmir Yüksek teknoloji Üniversitesi Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi laboratuvarında %5 ölçüm hassasiyeti, -10 - 200 °C sıcaklık aralığında ve 0,023-11,63 W/mK ölçüm aralığında ölçüm yapabilen KEM QTM 500 cihazı ile 2x5x10 cm boyutlarındaki örnekler üzerinde ölçülmüştür. 3 adet numunenin ısı iletim katsayıları, ön ve arka yüzlerinden üçer ölçüm alınarak belirlenmiştir. Örneklerin ölçüm değerleri ve bunların ortalamaları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Isı iletkenlik katsayısı ölçümü yapılan serilerin karışım oranları.

Seri Adı	Zeolit	Metakaolin	YFC	Alçı	Sönmemiş Kireç	S/Ç	S/T	B.H.A (kg/m ³)	Basınç Day. (MPa)
Z	1,5	-	-	0,3	0,3	2,81	0,77	550	1,40
M	-	1,5	-	0,3	0,3	3,75	1,03	490	1,55
YFC	-	-	1,5	0,3	0,3	2,50	0,68	630	3,28

Çizelge 4.8 Serilerin ısı iletkenlik katsayısı ölçüm değerleri.

Örnek No	Ölçüm yeri		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3
Z	Ön yüz	λ	0,142	0,138	0,132
	Arka Yüz	λ	0,144	0,140	0,138
	Ortalama (W/mK)			0,139	
M	Ön yüz	λ	0,146	0,148	0,148
	Arka Yüz	λ	0,126	0,126	0,123
	Ortalama (W/mK)			0,136	
YFC	Ön yüz	λ	0,121	0,120	0,121
	Arka Yüz	λ	0,129	0,129	0,144
	Ortalama (W/mK)			0,127	

Serilerin ısı iletkenlik katsayıları ön yüz ve arka yüzden yapılan 6 okumanın ortalamalarının alınması sonucu, zeolit ile üretilen seride 0,139 W/mK, metakaolin ile üretilen seride 0,136 W/mK, yüksek fırın cürufu ile üretilen seride ise 0,127 W/mK olarak bulunmuştur.

Isı iletkenlik ölçümleri yapılan örneklerin literatürde kullanılan standart değerlere göre karşılaştırmalı sonuçları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Serilerin ısı iletkenlik katsayılarının standart değerlerle karşılaştırılması.

Seri Adı	Birim Hacim	Isı İletkenlik	TS 825'e göre	TS 825'e göre
	Ağırlık (kg/m ³)	Katsayısı (W/mK)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
Z	550	0,139		
M	490	0,136	400-800	0,14-0,23
YFC	630	0,127		

Gözenekler içerisindeki durgun havanın ısı iletkenliği azdır. Ayrıca gözenek miktarı arttıkça malzemenin birim hacim ağırlığı azalır. Birim hacim ağırlığı azaldıkça ısı iletkenlik değerinde de azalış gerçekleşir. Ancak Çizelge 4.9'da M ve C serilerinin birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırıldığında durum tam tersine bir haldedir. Birim hacim ağırlığın artışıyla birlikte ısı iletkenlik katsayısında düşüş gerçekleşmiştir. Bu durumun metakaolin ve yüksek fırın cürufu hammaddelerinin yoğunluğu ve makrop yapıdaki gözenekleri oluşturan kabukların (duvarların) kalınlığı ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

Sonuç olarak, bulunan ısı iletkenlik katsayısı değerleri Çizelge 4.9'da verilen standart değerler ile karşılaştırıldığında; aynı birim hacim ağırlık değerleri için gazbeton örneklerin ısı iletkenlik değerlerinin standart ısı iletkenlik değerlerinden daha iyi olduğu belirlenmiştir. Farklı bir ifadeyle, üretilen örneklerin ısı yalıtım performanslarının standart örneklerle göre daha iyi seviyelerde olduğu düşünülmektedir.

4.11 Donma Çözünme ve Kapiler Su Emme Bulguları

Bu bölümde belirlenen deney örnekleri üzerinde gerçekleştirilen donma-çözünme ve kapiler su emme bulgularına yer verilmiştir. Donma-çözünme deneyi uygulanan deney örneklerine ait bulgular Çizelge 4.10'da verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, donma-çözünme çevrimleri sonrasında en fazla dayanım kaybı %17,57 olarak zeolit ile üretilen seride tespit edilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkı ilaveli seriler içerisinde de en fazla dayanım kaybı zeolit ile üretilen seride %9,05 olarak tespit edilmiştir.

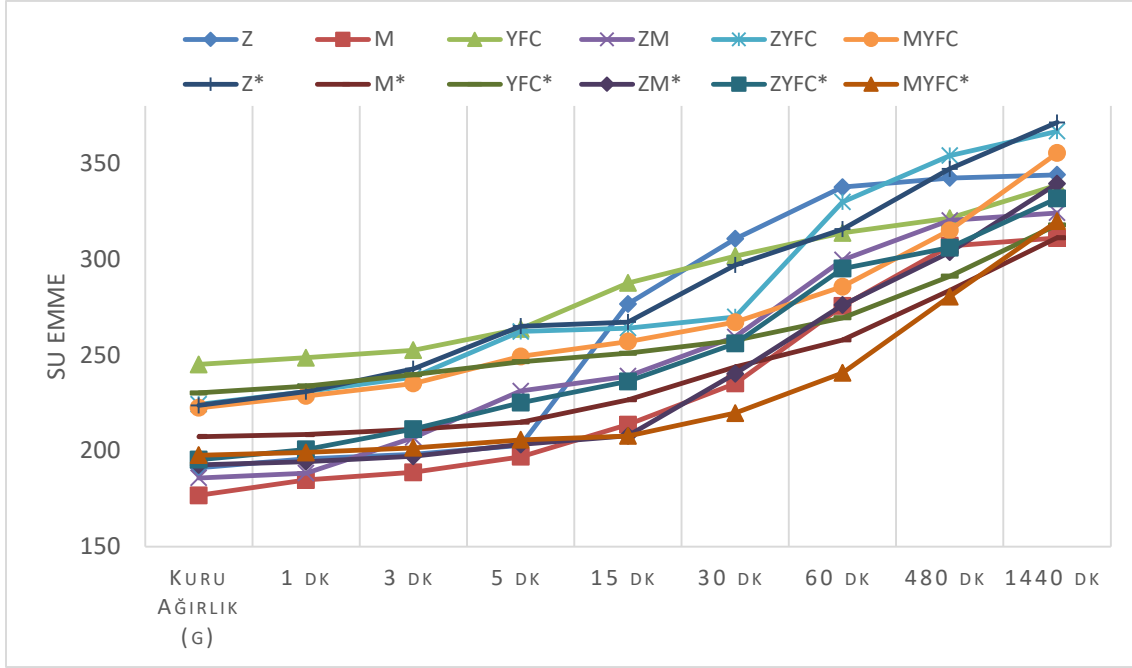
Çizelge 4.10 Donma-çözülme bulguları.

Seri Adı	İlk Dayanım (MPa)	Çözünme Sonrası Dayanım (MPa)	Dayanım Kaybı (%)
Z	1,48	1,22	17,57
M	1,6	1,43	10,63
YFC	3,25	3,12	4,00
ZM	1,2	1,04	13,33
ZYFC	2,12	1,98	6,60
MYFC	3,68	3,57	2,99
Z*	2,43	2,21	9,05
M*	2,56	2,42	5,46
YFC*	3,65	3,52	3,56
ZM*	1,36	1,2	11,76
ZYFC*	1,4	1,25	10,71
MYFC*	2,45	2,35	4,08

*Akışkanlaştırıcı katkı

Tikalsky vd. (2004)'e göre donma çözünme dayanımının test edilmesi hafif betonların dayanıklılığı ve ekonomik kullanımı için oldukça önemlidir. 1 MPa'dan yüksek basınç mukavemeti olan gözenekli hafif betonların donma çözünme dayanımına karşı dirençli olduğunu ancak su emme kapasitesi yüksek olan hafif betonların donma çözünme dirençlerinin düşük olduğunu belirtmektedirler. Qu ve Zhao (2017) ise 500-600 kg/m³ kuru yoğunluğa ve 1 MPa ile 2 MPa basınç dayanımına sahip gazbetonların donma çözünme çevrimleri sonucu %1,5 oranında dayanım kaybı yaşamalarının mükemmel olduğunu belirtmektedirler. Bu bilgiler ışığında YFC ve YFC katkısı ile üretilen numunelerin donma çözünme dirençlerinin literatürdeki verilere daha yakın olduğu ve donma çözünme direncinin diğer serilere göre daha iyi olduğu söylenebilir. Malzemenin donma dayanıklılığını etkileyen faktörler arasında su emme miktarı önemlidir (Şengül vd. 2003). Çimento esaslı yapı malzemelerinde su emme miktarı yüksek olan malzemelerin donma-çözülme dayanıklılıklarının düşük olması beklenmektedir (Erdem ve Öztürk 2012). Elde edilen deneysel bulgular literatürde verilen bu bilgileri doğrular niteliktedir.

Çizelge 4.11'de belirlenen deney örnekleri üzerinde gerçekleştirilen kapiler su emme bulguları verilmiştir. En yüksek kapiler su emme değeri zeolit ile üretilen serilerde 0,11 kg/m²xs^{0,5} ve en düşük kapiler su emme değeri ise yüksek fırın cürufu ile üretilen serilerde 0,06 kg/m²xs^{0,5} olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.39'da serilere ait kapiler su emme değerlerine ilişkin grafik verilmiştir.



Şekil 4.39 Kapiler su emme grafiği.

Çizelge 4.11 Kapiler su emme bulguları.

Seri Adı	Kapiler Su Emme (kg/m ² xs ^{0,5})
Z	0,106
M	0,093
YFC	0,065
ZM	0,096
ZYFC	0,099
MYFC	0,092
Z*	0,102
M*	0,072
YFC*	0,061
ZM*	0,102
ZYFC*	0,095
MYFC*	0,085

*Akışkanlaştırıcı katkı

Prazak vd. (1992) yaptıkları çalışmada gazbetonların kapiler su emme değerlerinin 0,038 kg/m²xs^{0,5} ile 0,066 kg/m²xs^{0,5} aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir. Jerman vd. (2013) ise birim hacim ağırlığı 450 kg/m³ olan gazbeton numunelerin kapiler su emme değerlerini 0,168 kg/m²xs^{0,5} olarak bulmuşlardır. Hens (2012), kagir birim olarak tercih edilecek yapı malzemelerinin kapiler su emme değerlerinin, ortalama 0.05 kg/m²xs^{0,5} ve en yüksek 0.8 kg/m²xs^{0,5} aralığında olmasını, ancak bu değerlerin malzemenin porozitesine bağlı olarak değişebileceğini belirtmektedir. Elde edilen

veriler literatür verileri ile kıyaslandığında benzer sonuçlara ulaşıldığı söylenebilir.

4.12 Su Buharı Difüzyonu Direnç Katsayısı Bulguları

Bu bölümde, belirlenen deney örnekleri üzerinde gerçekleştirilen su buharı difüzyonu direnç katsayısı bulgularına yer verilmiştir. Su buharı difüzyon direnci; malzemenin belirli sıcaklık, nem ve kalınlık koşulları altında birim zamanda birim alanından geçen su buharı miktarını ifade eder. Bu difüzyon mekanizması yapı malzemelerinde μ (mü) değeri olarak tanımlanır ve her malzemenin μ değeri mevcuttur (İnt. Kyn. 6). Difüzyon direnç faktörü aynı dış şartlarda aynı kalınlık ve sıcaklıktaki hareketsiz hava tabakasına göre, malzemenin direncinin ne kadar büyük olduğunu karakterize eder (İnt. Kyn. 7). Çizelge 4.12’de belirlenen gazbeton deney örnekleri üzerinde gerçekleştirilen su buharı difüzyonu direnç faktörü bulguları verilmiştir.

Çizelge 4.12 Su buharı difüzyonu direnç katsayıları.

Seri Adı	μ
Z	9,06
M	8,70
YFC	9,35

RILEM (1993)’e göre gazbetonların su buharı difüzyonu direnç katsayıları 4 ile 10 arasında değişmektedir. Aynı değer TS 825’de gazbetonlar için 5 ile 10 olarak belirtilmektedir. Adamczyk vd. (2015) ise yaptıkları çalışmalarında gazbetonların su buharı difüzyonu direnç katsayılarının 9 ile 11 aralığında değiştiğini tespit etmişlerdir. Elde edilen veriler literatür bilgileri ile uyum göstermektedir. Direnç katsayıları arasındaki farkın gazbetonların birim ağırlık değerlerinin farklı olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Aköz vd. (2017)’de yaptıkları çalışmada birim hacim ağırlıktaki azalmanın su buharı geçirimsizliğinde artışa neden olduğunu ve su buharı difüzyonu direnç katsayısının betonun birim hacim ağırlığı ile ilgili olduğunu tespit etmişlerdir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında zeolit, metakaolin ve YFC temel hammaddeleri esas alınarak gazbeton üretimi deneysel olarak araştırılmıştır.

ASTM C 311'e göre yapılan 7 ve 28 günlük pozolanik aktivite indeks sonuçlarına göre, metakaolin ve YFC'nin aktivite değerlerinin standart değerlerle uyduğu, zeolit ise pozolanik aktivite değerlerinin standart değerlerin altında kaldığı belirlenmiştir. XRD analizleri sonucunda YFC'nin amorf yapıya sahip olduğu ancak bazı noktalarda kristal kuvarz piklerinin bulunduğu, zeolitinin klinoptilolit yapısında olduğu belirlenmiştir. Metakaolinin alüminyum silikat ve kuvarz mineral fazlarından oluştuğu tespit edilmiştir. Zeolit, metakaolin ve YFC'nin mineral yapısında gazbeton üretimi için sakıncalı olabilecek bileşenlere rastlanmamıştır.

Üç temel hammadde esas alınarak oluşturulan karışımlarda, çimento miktarı belirli oranlarda azaltılarak nihai ürüne olan etkileri araştırılmıştır. Çimento oranının azalması S/T ve S/Ç oranını arttırdığından mukavemeti azaltıcı yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Karışım içerisindeki çimento miktarı arttıkça mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu durumun çimento miktarındaki artışa bağlı olarak sistem içerisinde artacak olan ve mukavemet gelişimini sağlayan C_2S ve C_3S fazlarının hidrasyonuna bağlı gelişen C-S-H fazı oluşumunun doğal bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu sonuç, yapılan SEM- XRD incelemelerinde yüksek çimento içeren numunelerde daha fazla CSH jel yapısının ve CSH(I) fazının gözlemlenmesi ile doğrulanmıştır.

Karışımlarda kullanılan malzemelerin özgül yüzey alanları ve tane boyutlarının farklı olması nedeniyle tüm serilerde aynı kıvama ulaşabilmek amacıyla farklı su oranları seçilmiştir. Buna bağlı olarak örneklerin BHA değerlerinde farklılıklar meydana gelmiştir. BHA değerlerini etkileyen diğer bir faktör de karışımlardaki çimento miktarı olmuştur. Çimento miktarındaki azalma karışımlardaki toplam katı miktarındaki azalma ile ilişkili olarak BHA değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

Basınç dayanım değerleri incelendiğinde, YFC ile üretilen serilerin dayanım değerleri diğer serilere göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca kullanılan hammaddelerin birbirleri arasında karıştırılması sonucu üretilen serilerin basınç dayanım değerlerine göre, YFC katkı birlikte kullanıldığı diğer hammaddelerin de basınç dayanım değerlerini artış yönünde etkilemiştir. YFC'nin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeks değerlerinin zeolit ve metakaoline göre daha yüksek oluşu bu duruma sebep olarak söylenebilir. Süperakışkanlaştırıcı katkı ile birlikte üretilen serilerin dayanım değerlerinin katkısız serilere göre yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Çimento partikülleri birbiriyle birleşmek suretiyle küçük topaklar oluşturmaya meyillidirler. Akışkanlaştırıcılar su ile birleşerek beton içerisindeki suyun yüzey gerilimlerini ve çekim gücünü azaltırlar. Bu etkileri dolayısı ile topaklaşmayı önlemeleri ve aynı zamanda tanelerin birbiri üzerinden kaymalarını kolaylaştırmak ve yağlayıcı etki göstermeleri betonun iç sürtünmesini azaltmakta, işlenebilirliğini artırmakta ve kohezyonu kuvvetli bir yapı oluşturarak dayanımın artışına sebep olabilmektedirler.

Zeolit ile üretilen serilerin basınç dayanımı değerleri metakaolin ile üretilen serilere göre daha düşük değerlerdedir. Mikroyapı incelemelerinde zeolit ile üretilen serilerde gözlemlenen etrengit fazının dayanımın düşmesine neden olduğu değerlendirilmektedir.

Dinamik elastisite modülü değerleri incelendiğinde, çimento miktarının azalmasıyla birlikte E_d değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Malzeme bünyesindeki boşluk ile ilişkili olan bu durumda bunun en önemli sebebinin, alüminyum tozunun oluşturduğu kapalı boşlukların çimento hidratasyon ürünleri tarafından tamamen çevrilerek içerisine su almaması ve bu sayede porozif yapısının artırılmış olmasıdır. Diğer yandan çimento ürünlerinin otoklav kürü sırasında hidrate olarak serbest suyu harcamaları ve yeni C-S-H fazları oluşturarak numune içerisindeki serbest boşlukların dolması sağlanmaktadır. Yeni hidrate ürünlerin oluşmasıyla ultrases geçiş hızında artış beklense de, alüminyum tozunun etkisiyle oluşan boşluklar, bu hidrate ürünlerin içerisinde homojen bir şekilde dağılarak kapalı poroz bir yapı oluşturmuşlardır.

Deneylerde kullanılan başlangıç hammaddeleri, karışım oranı ve otoklav basınç-sıcaklık şartları ve elde edilen XRD sonuçlarına göre, üretim şartları sonucunda oluşacak temel

kristal CSH fazının ağırlıklı olarak Xonotlit olduğu ancak tobermorit oluşumunun da sağlandığı sonucuna varılmıştır. Ticari gaz betonlarda ise temel kristal CSH fazı tobermorit fazıdır. Serilerin mikroyapılarının SEM ve XRD tekniklerinin kullanılarak incelenmesi sonucunda, tobermorit, xonotlite, portlandit, etrengit, mullit, klinoptilolit, CSH(I) gibi mineral bileşenler gözlenmiştir. Özellikle zeolit ile üretilen serilerde etrengit oluşumunun dayanım kaybında önemli bir etken olduğu değerlendirilmektedir. Serilerde xonotlit fazının gözlenmesi otoklav içerisindeki sıcaklık ve basınç rejimi sonucunda, literatür ile benzer sonuçların elde edildiğini göstermektedir.

Örneklerin rötre değerleri literatürde belirtilen değerlere benzerlik göstermektedir. Rötre değerleri zeolit ile üretilen seride 0,08, metakaolin ile üretilen seride 0,11 ve YFC ile üretilen seride 0,02 olarak ölçülmüştür. Rötre değerlerinin yüksek çıkması, kullanılan hammaddelerin fiziksel özellikleri ile ilişkili olabilir. Zeolit ve metakaolinin yüzey alanlarının cürufa göre daha fazla olması daha fazla su kullanılmasına ve otoklav içerisindeki yüksek sıcaklık ve buhar basıncı ile birlikte daha fazla rötre yapmalarına sebep olarak gösterilebilir.

Örneklerin ısı iletkenlik katsayıları incelendiğinde zeolit ile üretilen serilerin ısı iletkenlik katsayı değeri 0,13 W/mK, metakaolin ile üretilen serilerin ısı iletkenlik katsayı değeri 0,13 W/mK, ve YFC ile üretilen serilerin ısı iletkenlik katsayısı değeri ise 0,12 W/mK değerlerindedir. Bu değerler piyasadaki benzer gazbeton ürünler ile uyum göstermektedir.

Makroyapı incelemelerinde, metakaolin ile üretilen serilerin gözenek yapılarının küresel ve eşeksenli gözenek yapısına daha yakın, YFC ve zeolit ile üretilen serilerin gözenek yapılarının küresel şekilden uzaklaşarak silindirik bir yapıya daha yakın halde ve eşeksenli gözenek yapısından uzaklaştıkları tespit edilmiştir. Akışkanlaştırıcı katkının serilerin gözenek yapısına spesifik bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Örneklerin kıvam ve akışkanlık özellikleri değerlendirildiğinde sadece zeolit ile ve zeolit katkılı serilerin akışkanlık özelliklerinde kesikli akış gözlenmiştir. Zeolitin su emme değerinin yüksek oluşu karışım suyunu bünyesine hapsederek, kıvam kaybı

oluşmasına sebep olarak gösterilebilir. Karışımlarda süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı akışkanlık özelliklerini olumlu yönde geliştirmiştir.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada, zeolit, metakaolin ve YFC'nin öğütülmüş kuvars kumu yerine kullanılarak çimento esaslı gaz beton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada bir endüstriyel atık olan YFC'nin gazbeton üretiminde öğütülmüş kuvars kumu yerine kullanılabileceği belirlenmiştir. Zeolitin pozolanik aktivite indeks değerinin düşük olması, metakaolinin ise maliyetinin zeolit ve YFC'ye göre yüksek olması sebebiyle, en uygun hammadde seçeneği YFC olarak belirlenmiştir.

Geleneksel gazbeton üretiminde kullanılan silis/kuvars kumu doğadan alınarak kırma, öğütme, eleme taşıma vb. işleminden sonra üretime uygun hale getirilmektedir. Bu nedenle doğal kaynakların ve çevrenin tahribine, ayrıca yüksek oranda enerji tüketimine yol açmaktadır. Buna karşılık endüstriyel bir atık olan YFC Türkiye'de yıllık yaklaşık 2,7 milyon ton olarak açığa çıkmaktadır (TÇÜD 2015). YFC'nin gazbeton üretiminde kullanılarak geri dönüştürülmesi ile hem doğal çevrenin korunmasına katkı sağlanacak hem de daha ekonomik bir üretim prosesi uygulanabilecektir.

Daha sonra yapılacak çalışmalarda farklı hammaddeler ve özellikle atık mineral malzemelerin kullanımı ile yürütülecek bilimsel çalışmaların enerji, doğal kaynakların korunması ve sürdürülebilir üretime katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Adamczyk, J., Zarebska, J. and Ingrao, C. (2015). Cellular concrete- the material of sustainable construction. *Technical Issues*, **1**:3-12.
- Aguilar, A., S., Melo, J., P. and Olivares, F., H. (2013). Microstructural analysis of aerated cement pastes with fly ash, Metakaolin and Sepiolite additions. *Construction and Building Materials*, **47**: 282–292.
- Aker, A. (2011). Uçucu küllerle üretilen genişletilmiş perlit katkılı gazbeton numuneler üzerinde kür etkisinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Akgül, A., F. (2010). İnşaat sektörü ve gazbeton işletmelerindeki stratejik yöntemler. İstanbul Ticaret Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Aksoy T., U. (2008). Sandviç ve gazbeton duvar uygulamalarının ortalama ısı geçirgenlik katsayısı ve ısı kaybı üzerindeki etkisinin incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **24**: 277-290.
- Aköz, F., Yüzer, N., Kabay, N., Kızılkant, A. ve Aktürk, B. (2017). Hafif, normal ve yüksek dayanımlı betonların termofiziksel özelliklerinin karşılaştırılması. *Hazır Beton*, **Ocak-Şubat**: 81-86.
- Albayrak, M., Yörükoğlu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntaş, H.Y. ve Girgin, İ. (2007). Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete. *Building and Environment*, **42**: 3161-3165.
- Altınışik, K., (2016). Isı yalıtımı. Nobel Akademik Yayıncılık, 2. Baskı, Ankara.
- Almaz, Z. (2010). Metakaolin ve silis dumanı içeren harç karışımlarının özellikleri. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Andolsun, S. (2006). A study on material properties of autoclaved aerated concrete and its complementary wall elements: their compatibility in contemporary and historical wall sections. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Ankara.

- Anuk, D. (2011). Metakaolin kullanımının çimento harçlarının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- ASTM C311, (1994). Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland-cement concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C494 / C494M-16, (2016). Standard specification for chemical admixtures for concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C597-16, (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete, ASTM international, West Conshohocken, PA.
- Auerbach S., Carrado K., Dutta P. (2003). Handbook of Zeolite Science and Technology. Marcel Dekker Inc., New York 12701, U.S.A.
- Bapat, J., D. (2013). Mineral Admixtures in Cement and Concrete. CRC Press.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S. (2015). Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:334. İzmir.
- Başpınar, M.S., Demir, İ., Kahraman, E. ve Görhan, G. (2014). Utilization potential of fly ash together with silica fume in autoclaved aerated concrete production. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18(1)**:47-52.
- Bilim, C. (2006). Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, T., S. ve Çapar, Ö., F. (2010). Yüksek fırın cürufunun inşaat sektöründeki yeri ve önemi. 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi., syf:505-513, 18-20 Ekim 2010, Mersin.
- Bisceglie, F., Gigante, E. and Bergonzoni, M. (2014). Utilization of waste autoclaved aerated concrete as lighting material in the structure of a green roof. *Construction and Building Materials*, **69**:351-361.
- Boğa, A., R., (2010). Yüksek fırın cürufu ve korozyon inhibitörü kullanımının beton içerisindeki donatı korozyonuna ve beton özelliklerine etkileri. Eskişehir

Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

Brandt, M., A. (2009). Cement-Based Composites. Taylor&Francis Publishing, New York, USA.

Bukhari, S.S., Behin, J., Kazemian, H. and Rohani, S. (2015). Conversion of coal fly ash to zeolite utilizing microwave and ultrasound energies: A review. *Fuel* **140**:250-266.

Bulmuş, T. ve Yıldırım, Ö.S. (2009). X-Işını toz kırınım yöntemi ile bir seri çimento örneğinin nitel analizi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **25**: 183 – 196.

Borhan, B. (1987). YTONG El Kitabı. 1. Baskı.

Canbaz, M. (2007). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu harçların özellikleri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

Cerny, V. and Drochytka, R. (2014). Utilization of FBC ash in autoclaved aerated concrete technology. *International Journal Of Materials*, **1**:79-83.

Colella, C., Gennaro, M. de' and Aiello, R. (2001). Use of Zeolitic Tuff in Building Industry, Reviews in Mineralogy and Geochemistry; Natural Zeolites, ed: D.L. Bish, D.W. Ming, Mineralogical Society of America, Vol. 45, Chapter 16, pp:551-587.

Çalışkan, E. (2015). Diatomitten atmosferik buhar kürü yöntemi ile gazbeton üretimi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

Çelik, Ç. (2005). Gazbeton üretiminde uçucu külün kullanılabilirliğinin araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Ankara.

Çelikten, S. (2014). Çelik fiber içeren yüksek dayanımlı beton özellikleri üzerine metakaolin ve öğütülmüş pomzanin etkisi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.

Çiçek, Y.E. (2002). Pişmiş toprak tuğla, bimsbeton, gazbeton, ve perlitli yapı malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak

incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi İstanbul.

Çimentaş, (1998). Gazbeton Tasarım ve Uygulama El Kitabı. 10. Baskı, İzmir.

Demir, İ., Başpınar, M.S., Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve İçağa, Y. (2011). Yüksek SiO₂ İçerikli Endüstriyel Atıkların Gazbeton Blok Üretiminde Kullanım Parametrelerinin Belirlenmesi. TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No: 190M245.

Demir, İ., Başpınar, M.S. ve Kahraman, E. (2016). Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi. TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No: 5140029.

Diamant, R.M.E. (1986). Thermal and Acoustic Insulation. Cambridge University Press, England.

Domingo, E.R. (2008). An introduction to autoclaved aerated concrete including design requirements using strength design. Kansas State University, Department of Architectural Engineering & Construction Science College of Engineering. MSc. Thesis. Kansas, USA.

DPT, (1996). Diğer Endüstri Mineralleri, V11. Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu Cilt 1, Ankara.

Emekli, A.S. (2015). Yüksek performanslı betonlarda kür koşullarının yüksek fırın cürufu etkinliği üzerine etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Erdem, T.R. ve Öztürk, U.A. (2012). Mermer tozu katkısının çimento harcı donma-çözülme özellikleri üzerine etkisi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, **1(2)**: 85-91.

Erdoğan T. Y. (2015). Beton. Metu Press, 5. Baskı.

Erdoğan S.T. ve Erdoğan, T.Y. (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi. ODTÜ yayıncılık Ankara.

Eriç, M. (2010). Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literaür Yayıncılık, İstanbul.

Ersoy H., Y. (2001). Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

Girgin, S. (2016). NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

- Gökçe, M. (2017). Beton katkıları. İKSA İnşaat Katkıları San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul.
- Grutzeck, M., Kwan, S. and Di Cola M. (2004). Zeolite formation in alkali-activated cementitious systems. *Cement and Concrete Research*, **34**: 949-955.
- Gupta, S. and Garg, S. (2014). Strength & density of an autoclaved aerated concrete using various air entraining agents. *International Journal Of Civil Engineering And Technology*, **5(7)**:107-112.
- Güçlüer, K. (2011). Uçucu külden üretilen silis dumanı katkılı gazbeton örnekleri üzerine kür etkisinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Güçlüer, K., Ünal, O. ve Demir, İ. (2014). Buhar kürlü gazbetonun mekanik ve fiziksel özelliklerine pozolan katkısının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **14**:1-6.
- Güçlüer, K., Ünal, O., Demir, İ. ve Başpınar, M., S. (2015). An investigation of steam curing pressure effect on pozzolan additive autoclaved aerated concrete. *TEM Journal*, **4**:78-82.
- Gülen, J., Zorbay, F. ve Arslan, S. (2012). Zeolitler ve kullanım alanları. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi /Karaelmas Science and Engineering Journal* **2 (1)**, 63-68, 2012.
- Gültekin, E. (2014). Metakaolin katkılı taşıyıcı hafif betonun yüksek sıcaklık altındaki davranışının incelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Gürkan, A. (2006). Pomza ve zeolitin alkali silica reaksiyonu üzerine etkisi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Hamalı, Y. (2007). Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Hens, H. (2012). Performance Based Building Design 1. Ernst & Sohn Publishing.
- Hitit, A. (2011). Enstrumental Analiz Ders Notları. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.

- Huang, X., Ni, W., Cui, W., Wang, Z. and Zhu, L. (2012). Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, **27**:1-5.
- Jerman, M., Keppert, M., Vyborny, J. and Cerny, R. (2013). Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, **41**:352-359.
- Kapala, S. and Dachowski, R. (2016). The influence of the chalcedony on the properties of autoclaved aerated concrete. *Procedia Engineering*, **161**:699-703.
- Karaaslan, Y.K. (2009). Gazbeton yapı malzemesinin ısı özelliklerinin mevcut standartlara göre deneysel olarak incelenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi Kırıkkale.
- Karakurt, C., Kurama, H. and Topçu, İ.B. (2010). Utilization of Natural Zeolite in Aerated Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, **32**: 1-8.
- Karakurt, C. (2008). Çimento üretiminde doğal zeolit ve volkanik tüflerin endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmasının beton performansı üzerine etkileri. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Kartal, S. (2001). Ülkemiz inşaat sektöründe gazbeton kullanımı. Trakya Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne.
- Karaüç, E. (2008). Uçucu kül ve zeolitin kendiliğinden yerleşen betona etkileri. Sakarya üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Kurama, H. (1994). Doğal zeolit (klinoptilolit) ile atık sulardan ağır metal iyonlarının uzaklaştırılması. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Kosmatka, H.S., Kerkhoff, B. and Panarese, W.C. (2003). Design and Control of Concrete Mixture. 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.
- Kozak, Ş. (2010). Gazbeton üretiminde uçucu külün hammadde olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

- Kömürlü, R. ve Önel, H. (2007). Gazbeton yapı ürünlerinin konutlarda kullanımı. *YTÜ Mim. Fak. E-Dergisi*, **2**: 145-158.
- Kunchariyakun, K., Asavapisit, S. and Sombatsompop, K. (2015). Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate. *Cement and Concrete Composites*, **55**: 11-16.
- Kurama, H., Topçu, İ.B. and Karakurt, C. (2009). Properties of The Autoclaved Aerated Concrete Produced From Coal Bottom Ash. *Journal of Material Processing Technology*, **209**: 767-773.
- Kurt, H. ve Arık, F. (2015). Mineraloji. Nobel Akademik Yayıncılık.
- Kurdowski, W. (2014). Cement and Concrete Chemistry. Springer Edition.
- Kus, H. and Carlsson, T. (2003). Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**: 1423-1432.
- Laukaitis, A., Keriene, J., Mikulskis, D., Sinica, M. and Sezemanas, G. (2009). Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. *Construction and Building Materials*, **23**: 3034–3042.
- Laukaitis, A. and Fiks, B. (2006). Acoustical Properties of Aerated Autoclaved Concrete. *Applied Acoustics*, **67**: 284-296.
- Liu, Y., Leong, B., S., Hu, Z.T. and Yang, E. (2017). Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent. *Construction and Building Materials*, **148**: 140–147.
- Luga, E. (2015). Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu jeopolimer harçların özellikleri. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
- Lyazat, A. (2014). Process Parameters of production of non-autoclaved aerated concrete on the basis of complex use of ash and gypsum-containing wastes. *Mediterranean Journal of Social Sciences*, **5(23)**: 2565-2571.
- Ma, B., Cai, L., Li, X. and Jian, S. (2016). Utilization of iron tailings as substitute in autoclaved aerated concrete: physico-mechanical and microstructure of hydration

- products. *Journal of Cleaner Production*, **127**:162-171.
- Matsushita, F., Aono, Y. and Shibata, S. (2004). Calcium Silicate Structure and Carbonation Shrinkage of A Tobermorite Based Material. *Cement and Concrete Research*, **34**: 1251-1257.
- Mohammad, M. (2011). Development of foamed concrete: enabling and supporting design. a thesis presented in application for the degree of doctor of philosophy Division of Civil Engineering University of Dundee.
- Mostafa, N.Y. (2005). Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete. *Cement and Concrete Research*, **35**: 1349-1357.
- Mousa, M.A. and Uddin, N. (2009). Experimental and analytical study of carbon fiber-reinforced polymer (frp)/autoclaved aerated concrete (aac) sandwich panels. *Engineering Structures*, **31**: 2337-2344.
- Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B. and Shekarchi, M. (2012). An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials* **35**:1023-1033.
- Narayanan, N. and Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, **22**: 321-329.
- Nebioğulları, M.A. (2010). Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkısının beton hidrasyon sıcaklığına etkisi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Neville, A., M. (2011). Properties of Concrete. Pearson, 5th Edition, England.
- Newman, J. and Choo, B.S. (2003). Advanced Concrete Technology. Elsevier Publishing. Great Britain.
- Oymael, S. (2016). Yapı Malzemesi ve Yapı Fiziği İlişkisi. Birsan Yayınevi. İstanbul.
- Öcal, R. (2014). Yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonlar üzerindeki etkisi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Önel, M., Can, Ö., Tokgöz, H. ve Koçak, A. (2007). An experimental study about the compressive strenght and reinforcement adherence of aerates concrete panels having spalling property. *Sigma Journal of Engeneering and Natural Sciences*,

25: 161-169.

- Özel, G. (2013). Uçucu külün gazbeton özelliklerine etkisinin incelenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale.
- Özer, E. (2009). Niğde yöresi fesleğen yayla kaolin kilinden metakaolin üretilebilirliğinin araştırılması. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. Niğde.
- Pehlivanlı, Z. (2009). Gazbeton malzemesinin ısı iletkenliğinin nem ve sıcaklıkla değişiminin incelenmesi. *Int. J. Eng. Research Development*, **1**: 76-80.
- Pehlivanlı, Z., Uzun, İ., Yücel, Z.P. and Demir, İ. (2016). The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, **112**:325-330.
- Pražák, J. and Lunk, P. (1992). Capillary Suction of AAC, in: Proceedings of the Third RILEM International Symposium on Autoclaved Aerated Concrete (p.119-123). 14-16 October, 1992. Advances in Autoclaved Aerated Concrete, F.H. Wittmann, ed. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. (ISBN 90-5410-086-9).
- Ramamurthy, K. and Narayanan, N. (2000). Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. *Materials and Structures*, **33**: 243-250.
- RILEM, 1993. Recommended practice- RILEM Technical Committees: 78-MCA and 51-ALC. Autoclaved Aerated Concrete- Properties, Testing and Design. S. Aroni, G. J. de Groot, M. J. Robinson, G. Svanholm and F.H. Wittman ed. Taylor & Francis Group, London and New York, 1993.
- Rixom, R. and Mailvanagam, N. (1999). Chemical Admixtures for Concrete. Third edition, E&FN Spon Press, London.
- Rozycka, A. and Pichor, W. (2016). Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, **120**:65-71.
- Sarıkaya, H. (2006). Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Savaş, Ö. (2013). Sepiyolit gazbeton özelliklerine etkisinin incelenmesi. Kırıkkale

Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale.

Scrivener, K., Snellings, R., Lothenbach, B. (2016). A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press.

Shabbar, R., Nedwell, P. and Wu, Z. (2016). Influence of temperature and curing method on strength of autoclaved aerated concrete. Proceeding of the MACE PGR Conference, Manchester, UK.

Shabbar, R., Nedwell, P. and Wu, Z. (2018). Porosity and water absorption of aerated concrete with varying aluminium powder content. *International Journal of Engineering and Technology*, **10(3)**:234-238.

Shetty, M.S. (2005). Concrete Technology Theory and Practice. S. Chand Company Ltd. India.

Shi., C., Krivenko, P.V. and Roy, D. (2006). Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor and Francis Publishing.

Sürül, O. (2015). Yüksek fırın cürufu ve uçucu külün tuğla üretiminde katkı olarak kullanılmasının araştırılması. Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak.

Şengül, Ö., Taşdemir, C., Koruç, C. ve Sönmez, R., (2003). Agregat türünün betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisi. 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, 3-4 Aralık, İstanbul.

Şimşek, O. (2012). Beton ve Beton Teknolojisi. Seçkin Yayıncılık. 4. Baskı. Ankara.

Tanaçan, L., Ersoy, H.Y. ve Arpacıoğlu, Ü. (2009). Effect of high temperature and cooling conditions on aerated concrete properties. *Construction and Building Materials*, **23**: 1240-1248.

TÇÜD. (2015). Demir Çelik Cüruf Raporu, Türkiye Çelik Üreticileri Derneği.

Tevrizci, M.M. (2010). Metakaolin katkılı harçların bazı durabilite özelliklerinin incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.

Tikalsky, P., Pospisil, J. and MacDonald, W. (2004). A method for assessment of the freeze-thaw resistance of preformed foam cellular concrete. *Cement and Concrete*

Research, **34**: 889-893.

Thomas, D. (2014). Concrete Durability. CRC Press.

Tokay, M. (2016). Cement and Concrete Mineral Admixtures. CRC Press.

Tokay, M. ve Erdoğan, K. (2009). Cürüflar ve cürüüflu çimentolar. TÇMB, Ar-Ge Raporu, 8. Baskı, Ankara.

Topçu, İ.B., Demir, A. ve Boğa, A.R. (2004). Akışkanlaştırıcı ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımının taze beton özelliklerine etkisi. *TMH*, **4**: 38-40

Topçu, İ.B. (2006). Beton Teknolojisi. Uğur Ofset A.Ş. Eskişehir.

Turanlı, L., Yücel, H., Göncüoğlu, C., Çulfaz, A. ve Uzal, B. (2007). Doğal zeolitlerin inşaat endüstrisinde kullanımı. TÜBİTAK Araştırma Projesi, Proje No: 104M393.

TS 453 (1988). Gaz ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 680 (2006). Gaz beton - Kuruma büzülmesi tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 772-11 (2002). Kâgir Birimler - Deney Metotları - Bölüm 11: Betondan, Yapay Ve Doğal Taştan Yapılmış Kâgir Birimlerde Kapiler Su Emme Ve Kil Kâgir Birimlerde İlk Su Emme Hızının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 772-15 (2002). Kâgir birimler - Deney metotları - Bölüm 15: Gazbeton kâgir birimlerde su buharı geçirgenliğinin tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 772-18 (2002). Kâgir birimler - Deney metotları - Bölüm 18: Kireç kumtaşı kâgir birimlerde donma çözölmeye dayanıklılığın tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 825 (2008). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-3 (2002). Çimento deney metotları- Bölüm 3: Priz süresi ve hacim genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-6 (2010). Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 197-1 (2002). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450 (1988). Betonda Kullanılan Uçucu Kül – Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 679 (2008). Gazbeton – Basınç dayanımı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2 (2010). Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3526 (1980). Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Ulu, C. (2016). Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu ve metakaolinli harçlarda atık pet agrega kullanımının araştırılması. Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- Uysal, M., Gündoğdu, B.C. ve Sümer, M. (2012). Gazbetonun kuruma rötresine bağlayıcı malzeme miktarı değişiminin etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **28(4)**: 303-308.
- Ünverdi, A. (2006). Yüksek sıcaklık altında gazbeton kırıklı betonların dayanımlarının incelenmesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Vu, D.D. (2002). Strength Properties of Metakaolin-Blended Paste, Mortar and Concrete. Delft University Press, Netherlands.
- Walczak, P., Malolepszy, J., Reben, M., Szymanski, P. and Rzepa, K. (2015). Utilization of waste glass in autoclaved aerated concrete. *Procedia Engineering*, **122**: 302-309.
- Walczak, P., Szymanski, P. and Rozycka, A. (2015). Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350 kg/m³ as an environmentally friendly material for energy-efficient constructions. *Procedia Engineering*, **122**: 39-46.

- Wang, C., Ni, W., Zhang, S., Wang, S., Gai, G. and Wang, W. (2016). Preparation and properties of autoclaved aerated concrete using coal gangue and iron ore tailings. *Construction and Building Materials*, **104**:109-115.
- Wongkeo, W. and Chaipanich, A. (2010). Compressive Strenght, Microstructure and Thermal Analysis of Autoclaved and Air Cured Structural Lightweight Concrete Made With Coal Bottom Ash and Silica Fume. *Materials Science and Engeneering*, **A 527**: 3676-3684.
- Qu, X. and Zhao, X. (2017). Previous and present investigations on the components, microstructure and main properties of autoclaved aerated concrete –A review. *Construction and Building Materials*, **135**:505-516.
- Xia, Y., Yan, Y. and Hu, A. (2013). Utilization of circulating fluidized bed fly ash in preparing non-autoclaved aerated concrete production. *Construction and Building Materials*, **47** :1461–1467.
- Yazıcı, H. (2015). Beton Teknolojisi Ders Notları. Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Yıldırım, S. (2007). Puzolanik zeolitin çimentoda katkı uygunluğunun araştırılması. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Hatay.
- Yılmaz, Y. (2014). Beton Üretiminde Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılması etkileri ve maliyet analizi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ.
- Yuan, B., Straub, C., Segers, S., Lu, Q.L. and Brouwers, H.J.H. (2017). Sodium carbonate activated slag as cement replacement in autoclaved aerated concrete. *Ceramics International*, **43**: 6039–6047.

İnternet Kaynakları

- 1) <http://www.oocities.org/ukibaroglu/calismalar/zeolit.htm>, 16.03.2015
- 2) <http://www.wikipedia.org>, 10.03.2015
- 3) https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu, 15.07.2015
- 4) <http://www.pb-aac.de/cshe.html>. 24.07.2016 10:45, 14.04.2016
- 5) http://www.nuhyapi.com.tr/admin/files/yapi_pdfler/katalog_guncel.pdf, 10.03.2017

6) <http://www.xpsturkiye.org>, 26.02.2018

7) <http://www.izomerkyalitim.com>, 26.02.2018



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kadir GÜÇLÜER
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara, 1987
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : kadirgucluer@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Kurtuluş Lisesi, (2001-2004)
Lisans : Afyon Kocatepe Üni., Teknik Eğitim Fak., Yapı Eğitimi,
(2005-2009)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üni., Fen Bilimleri Ens., Yapı Eğitimi
A.B.D., (2009-2011)
Doktora : Afyon Kocatepe Üni., Fen Bilimleri Ens., İnşaat Müh.
A.B.D., (2014-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Adıyaman Üni., Teknik Bilimler MYO, İnşaat
Bölümü, 2013-

Yayınları (SCI ve diğer) :

Güçlüer, K. (2016). Zeolit ve metakaolinin gazbeton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **16**:338-343.

Ünal, O., Güçlüer, K. (2016). Gazbeton üretiminde yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılabilirliğinin araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **16(Özel Sayı)**:218-221.

Ünal, O., Güçlüer, K. (2016). An investigation of the effect of zeolite on physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete. ICENS 2016 Proceeding book pp:324-329, Sarajevo.

Güçlüer, K., Ünal, O., Demir, İ. (2014). Buhar kürlü gazbetonun mekanik ve fiziksel özelliklerine pozolan katkısının etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **14**:1-6.

Güçlüer, K., Ünal, O., Demir, İ., Başpınar, M., S. (2015). An investigation of steam curing pressure effect on pozzolan additive autoclaved aerated concrete. *TEM Journal*, **4**:78-82.

