

T.C.
ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİNERAL KATKILI BETONLARIN BUHAR KÜRÜ VE
SICAKLIK DEĞİŞİMİ ALTINDA DAYANIMLARININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ABUZER ARİN
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2019

T.C.

ADİYAMAN ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİNERAL KATKILI BETONLARIN BUHAR KÜRÜ VE SICAKLIK
DEĞİŞİMİ ALTINDA DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

Abuzer ARİN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez / /2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından
oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Danışman

.....
Prof. Dr. Murat PALA
YAVUZ

Üye

.....
Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt

Üye

.....
Prof. Dr. Murat KOCA

Enstitü Müdür V.

**Bu çalışma Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
tarafından desteklenmiştir.
Proje No: MÜFYL/2018-0003**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge ve fotoğrafların kaynak
gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu'ndaki hükümlere tabidir

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MINERAL KATKILI BETONLARIN BUHAR KÜRÜ VE SICAKLIK DEĞİŞİMİ ALTINDA DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Abuzer ARİN

Adıyaman Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : **Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN**

Yıl : 2019, Sayfa sayısı: 106

Jüri : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN

Prof. Dr. Murat PALA

Dr. Öğr. Üyesi Cüneyt YAVUZ

Beton, çimento esaslı kompozit bir yapı malzemesidir. Çimentonun hidratasyon süreci ve ürünleri doğrudan beton özelliklerini etkilemektedir. Bu amaçla, istenilen beton kalitesini gerçekleştirmek amacıyla kür işlemleri uygulanmaktadır. Özellikle erken dayanım istenen beton için kür koşulları önemli bir etkidir. Genellikle beton malzemeye, laboratuvar şartlarında su tankı içerisinde bekletilerek dayanım kazandırılmaktadır. Bu çalışmada mineral katkı ikameli betonlara, farklı sıcaklık (110-145-165 °C) ve basınç (2-4-6 bar) değerlerinde basınçlı buhar kürü uygulanmıştır. Kür işlemlerinin ardından fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Mineral katkılı betonlarda basınçlı buhar kürü uygulaması sonucunda oluşan hidratasyon ürünleri taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, üretilen mineral katkılı serilerde nihai dayanımda düşüş olduğu görülürken en iyi mekanik değerler 4 bar buhar basıncı 145 °C sıcaklık değeri altında kürlenen numunelerde tespit edilmiştir. Otoklav kür uygulamasıyla birlikte ultrases geçiş hızı verilerinde artış tespit edilmiştir. SEM analizleri sonucunda portlandit, xonotlit, tobermorit mineral yapıları gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton; Farklı Kür Koşulları; Mikroyapı; Mineral Katkı.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF PRESSURE STEAM CURE AND TEMPERATURE EFFECT ON MINERAL ADDITIVES CONCRETE

Abuzer ARIN

Adıyaman University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Osman GÜNEYDİN

Year : 2019 , Number of pages: 106

Jury : Prof. Dr. Osman GUNAYDIN

Prof. Dr. Murat PALA

Asst. Prof. Dr. Cuneyt YAVUZ

Concrete is a cement based composite building material. Cement's hydration process and products directly affect the concrete properties. For this purpose, curing operations are carried out in order to realize the desired concrete quality. Generally, concrete material is retained in water tank under laboratory conditions and it is given strength. In this study, pressurized steam curing was applied to concrete with mineral admixtures at different temperatures (110-145-165 °C) and pressure (2-4-6 bar) values. After curing, physical and mechanical tests were carried out. Moreover, hydration products which are formed as a result of the application of pressurized steam curing in mineral added concrete were investigated. According to the results obtained, the best mechanical values were determined at the samples cured under 145 °C temperature and 4 bar vapor pressure, while the pressure steam cure caused a decrease in the strength of the mineral added concretes. An increase in ultrasound pass rate data was observed with autoclave curing. As a result of SEM analysis, the mineral structures of portlandite, xonotlit and tobermorite were observed.

Key Words: Concrete; Different curing conditions ; Microstructure; Mineral Additive.

DESTEKLER

Bu tez çalışması Adıyaman Üniversitesi tarafından MÜFYL/2018-0003 numaralı proje ile desteklenmiştir.



BEYAN

“Mineral Katkılı Betonların Buhar Kürü ve Sıcaklık Değişimi Altında Dayanımlarının İncelenmesi” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Abuzer Arin
İmza

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında bana yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN'a ve araştırmalarımda bana yol gösteren Dr. Öğr. Gör. Kadir GÜÇLÜER hocama ve Adıyaman Üniversitesi İnşaat Mühendisliği öğrencileri Fatma ERTUĞRUL ve İbrahim Halil DEMİRHAN'a verdikleri desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bütün eğitim ve öğretim hayatım boyunca ilgi ve alakalarını eksik etmeyen, maddi ve manevi her zaman yanımda olan hayattaki en büyük değerlerim Aileme, tez çalışmalarımındaki destekleri ile her zaman yanımda olan Fuat ÖZCAN ve değerli eşi Sümeyye ÖZCAN'a, bana bilgi ve tecrübeleriyle desteğini esirgemeyen Arş. Gör. Ömer Faruk OSMANLI 'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını MÜFYL/2018-0003 proje numarası ile destekleyen Adıyaman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
DESTEKLER	III
BEYAN	IV
TEŞEKKÜR	V
İÇİNDEKİLER	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
RESİMLER DİZİNİ	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ	1
2. PUZOLANLAR	3
2.1 Pozolanik Reaksiyon ve Pozolanik Malzemelerin Aktivitesi	5
2.2 Pozolanların Sınıflandırılması	8
2.2.1 Doğal Pozolanlar	9
2.2.2 Yapay Pozolanlar	9
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	15
4. BETONUN KÜR EDİLMESİ	23
4.1 Beton Üretiminde Kürün Tanımı ve Temel Gereksinimleri	23
4.2 Betona Uygulanan Kür Yöntemleri	25
4.2.1 Su İle Uygulanan Kür Yöntemleri	25
4.2.2 Membran (Zar) Oluşturan Sıvı Bileşikleri İle Kür Yöntemleri	25
4.2.3 Isıl İşlemlerle Uygulanan Kür Yöntemleri	26
4.2.4 Nemli (İç) Kürleme Yöntemi	26
4.2.5 Çeşitli Hava Şartlarında Kürleme Yöntemleri	27
4.3 Buhar Kürü Tekniği	27
4.3.1 Yüksek Basınç Altında Buhar Kürü (Otoklav) Tekniği	27
4.3.2 Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Tekniği	29
4.3.3 Buhar Kürü Çevrimleri	31
4.3.4 Buhar Kürünün Aşamaları	32
5. HİDRATASYON VE MİKROYAPI	35
5.1 Çimentonun Hidratasyonu	35
5.1.1 Hidratasyon Süreçleri	40
5.2 Taramalı Elektron Mikroskobuyla Mikro Yapının İncelenmesi	42
5.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobunun Çalışma Prensibi	43
5.2.2 Elektron Demeti-Numune Etkileşimi	44
5.3 Hidratasyon Sırasında Mikroyapının Gelişmesi	44
5.3.1 Hidratasyon Ürünleri	45
5.3.2 Betonun Gözenekli yapısı	47
6. MATERYAL VE METODOLOJİ	50
6.1 Deneylerde Kullanılan Materyal ve Özellikleri	50
6.1.1 Çimento	50
6.1.2 Mineral ve Kimyasal katkıları	51
6.1.3 Kimyasal Katkıları	52

6.1.4 Karışım Suyu.....	52
6.1.5 Agregası.....	53
6.2 Metodoloji.....	54
6.2.1 Metodoloji Özeti.....	54
6.2.2 Beton Karışımlarının Hazırlanması.....	56
6.2.3 Uygulanan Kür Rejimleri.....	59
6.2.3.1 Standart Su Kürü	59
6.2.3.2 Basınçlı Buhar Kürü	59
6.2.4 Basınç Dayanımı Deneyi	61
6.2.5 Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri	62
6.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu İle Mikroyapı Çalışmaları	64
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	67
7.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerden Elde Edilen Bulgular	67
7.1.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları.....	67
7.1.2 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Basınç Dayanımları	68
7.1.3 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Mikroyapı Bulguları	69
7.2 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Veriler.....	73
7.2.1 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları.....	73
7.2.2 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları	74
7.2.3 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikro Yapı Bulguları.....	75
7.3 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Bulgular	79
7.3.1 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları.....	79
7.3.2 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları	79
7.3.3 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları.....	80
7.4 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Bulgular	84
7.4.1 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları.....	84
7.4.2 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları	85
7.4.3 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları.....	85
7.5 Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Karşılaştırması	90
7.6 Basınçlı Buhar ve Standart Su Kürü Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanımları Karşılaştırması.....	90
7.7 SEM Analizlerinde Tespit Edilen Hidratasyon Ürünleri.....	92
7.7.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Mikroyapı Bulguları	92

7.7.2 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları.....	93
7.7.3 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları.....	94
7.7.4 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları.....	96
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	98
KAYNAKLAR.....	101
KİŞİSEL BİLGİLER	107



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 Çimento ana bileşenlerinin relatif özellikleri	36
Çizelge 5.2 Hidrate çimento hamuru içindeki boşlukların sınıflandırılması.....	48
Çizelge 6.1 Karışımda kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	50
Çizelge 6.2 Karışımda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	50
Çizelge 6.3 Kullanılan mineral katkıların kimyasal bileşimleri.....	51
Çizelge 6.4 Beton Karışım Oranları (kg/m ³).....	56
Çizelge 7.1 Standart Su Kürü Basınç Dayanımı Bulguları.....	68



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması ve Türleri.....	8
Şekil 6.1 Karışım agregalarının granülometri eğrileri.....	54
Şekil 6.2 Uygulanan Kür Rejimi.....	60
Şekil 7.1 Standart Su Kürüne Tabi Tutulmuş Mineral Katkılı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları	67
Şekil 7.2 Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımı Bulguları.....	68
Şekil 7.3 2 bar basınç altında kür edilen numunelerin ultrases geçiş hızı verileri.....	73
Şekil 7.4 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları.....	74
Şekil 7.5 4 Bar Basınç Altında Üretilen Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları.....	79
Şekil 7.6 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları.....	80
Şekil 7.7 6 Bar Buhar Basıncı Altında Üretilen Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları.....	84
Şekil 7.8 6 Basınçlı Buhar Kürü Uygulanan Örneklerin Basınç Dayanımları.....	85
Şekil 7.9 Otoklav kürü ultrases geçiş hızı bulguları.....	90
Şekil 7.10 Basınçlı Buhar ve Standart Su Kürü Uygulanan Örneklerin Basınç Dayanımı Karşılaştırması.....	91

RESİMLER DİZİNİ

Resim 2.1 Puzolan Türleri; Sağdan Sola: Kalsine Edilmiş Şeyl, Yüksek Fırın Cürufu, F Sınıfı Uçucu Kül, Silis Dumanı, Metakaolin, C Sınıfı Uçucu Kül....	10
Resim 4.1 Tipik Bir Isıl İşlem Çevriminin Aşamaları.....	32
Resim 5.1 Hidratasyon Süreçleri.....	41
Resim 5.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	43
Resim 5.3 Çimento Hamuru İçindeki CH Kristalleri Ve C-S-H Jelleri.....	46
Resim 5.4 Çimento Hamurunda Oluşan Etrenjitlerin Görünümü.....	47
Resim 6.1 Uçucu Küle Ait XRD Analizi.....	52
Resim 6.2 Elek Analizi İçin Kullanılan Elekler ve Tartım İşlemi.....	53
Resim 6.3 Uygulanan Deney Metodoloji Özeti.....	55
Resim 6.4 Beton Karışımına Giren Malzemelerin Tartım İşlem Sırası.....	57
Resim 6.5 Beton Karışımının Hazırlanması	57
Resim 6.6 Hazırlanan Beton Karışımının Kalıplara Yerleştirilmesi.....	58
Resim 6.7 Hazırlanan Küp Numunelerin Kalıplardan Çıkarılması.....	58
Resim 6.8 Beton Numunelerin Kür Havuzunda Kür Edilmesi.....	59
Resim 6.9 Beton Numunelerin Otoklav İçerisinde Kür Edilmesi	60
Resim 6.10 Beton Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi.....	62
Resim 6.11 Beton Numunelerin Ultrases Ölçümlerinin Yapılması.....	63
Resim 6.12 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	64
Resim 6.13 Numune Kaplama Cihazı.....	65
Resim 6.14 Numunelere Kaplama Yapılma Anı.....	65
Resim 6.15 Numunelerin Sem Cihazına Yerleştirilme Anı.....	66
Resim 7.1 Silis Dumanı Katkılı Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri.....	70
Resim 7.2 Uçucu Kül Katkılı Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri.....	71
Resim 7.3 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri.....	72
Resim 7.4 Silis Dumanı Katkılı 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	76
Resim 7.5 Uçucu Kül Katkılı 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	77
Resim 7.6 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	78
Resim 7.7 Silis Dumanı Katkılı 4 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	81
Resim 7.8 Uçucu Kül Katkılı 4 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	82
Resim 7.9 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı 4 Bar Basıncılı Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	83
Resim 7.10 Silis Dumanı Katkılı ve 6 Bar Basınç Uygulanmış Örnekte C-S-H Jel Yapısı ve Tobermorit Oluşumu	86
Resim 7.11 Uçucu Kül Katkılı 6 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri	87
Resim 7.12 Yüksek fırın cürufu katkı ve 6 Bar Buhar Basıncı Uygulanmış	

Örnekte Tobermorit Oluşumu	88
Resim 7.13 Kristal C-S-H Fazları ve CaO-SiO ₂ -H ₂ O Sisteminde Gösterimi.....	89
Resim 7.14 Mineral Katkılı Olarak Üretilen Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri.....	93
Resim 7.15 2 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlen Numuneler.....	94
Resim 7.16 4 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlen Numuneler.....	95
Resim 7.17 6 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlen Numuneler.....	97



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_0	: Yüzey Alanı
bar	: Basınç Birimi
cm	: Santimetre
C	: Concrete, Beton
°C	: Santigrat Derece
f_c	: Beton Numunesi Basınç Dayanımı
f_{ck}	: Karakteristik Basınç Dayanımı
kg	: Kilogram
L	: Uzunluk
μm	: Mikrometre
μs	: Mikrosaniye
m^3	: Metre Küp
mm	: Milimetre
nm	: Milimikron
MPa	: Megapascal
V	: Beton Numunesi Hacmi
V_p	: Ultrases Geçiş Hızı

Kısaltmalar

ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu Standartları
CEM	: EN 197 Standart Serisine Göre Çimento Tipi.
C-S-H	: Kalsiyum-Silika-Hidrat
CH	: Kalsiyum Hidroksit
EN	: European Norm, Avrupa Standartları
PÇ	: Portland Çimentosu
S/Ç	: Su/Çimento Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
SD	: Silis Dumanı
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu

1. GİRİŞ

Ülkemizde inşa edilen yapıların büyük bir çoğunluğunda taşıyıcı sistemin betonarme olduğu bilinmektedir. Bu durumda, betonarme olarak yapılacak yapıyı teşkil eden temel iki bileşen olan beton ve donatının ve bunların birleşimi ile oluşan kompozit malzemenin önemi artmaktadır. Bu bilgiler ışığında betonu oluşturan malzemelerin yanı sıra beton dayanıklılığını esas alan betonun yapım, döküm ve koruma şartlarının önemi de aynı oranda artmaktadır. % 95 ‘inin deprem kuşakları üzerinde bulunan ülkemizde beton kalitesinin ve ona bağlı olarak betonarme taşıyıcı sistemlerin dayanım ve dayanıklılığı hayati önem arz etmektedir [1]. Son olarak Van ilimizde meydana gelen depremde oluşan hasarlar bunu açıkça göstermiştir [2].

Beton, çimento, iri ve ince agregası, su ve gerektiğinde katkı maddesinin uygun oranlarda ve homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamlı olup zamanla çimentonun hidratasyonu nedeniyle sertleşip dayanım kazanan kompozit bir yapı malzemesi olarak ifade edilmektedir [3]. Bir başka deyişle *yapay bir taş* olarak ifade edilebilen beton, çimentonun su ile girdiği kimyasal reaksiyon sonucu oluşturduğu bağlayıcı yapısıyla, kum ve iri agregası tanelerini birbirine bağlayan ve zamanla dayanım kazanan monolitik bir yapı malzemesidir [4]. Bu malzeme çimento ile suyun karışımından oluşan çimento hamuru agregası taneleri arasındaki boşlukları doldurarak, betonun bir bakıma iskeletini oluşturur ve prizini aldıktan sonra sertleşerek dayanım kazanmasını sağlarlar.

Dolayısıyla betonun dayanımı 3 temel malzemenin dayanımına bağlıdır. Bunlar;

1. Çimento ve suyun oluşturduğu çimento hamurunun dayanımına,
2. Betonun ana iskeletini oluşturan kum ve iri agregasının dayanımına,
3. Agregası taneleri ile çimento hamuru arasında oluşan kenetlenme gücüne yani aderansa bağlıdır [5].

İnsan yaşamında bu kadar geniş bir alana sahip olan ve temel barınma ihtiyaçlarımızı sağlayacak özellikte bir betonun üretilebilmesi, betonu oluşturacak

temel malzemelerin içyapısının iyi bilinmesinden geçmektedir. Üretilen betonun her türlü fiziksel ve kimyasal etkenlere karşı koyabilecek dayanıklılıkta olması en az betonun dayanımı kadar önemlidir [3].

İnşaat endüstrisinin önemli yapı malzemelerinden olan beton, uygun malzemelerin bir araya getirilip belirli oranlarda karıştırıldığında, kalıplarda istenilen biçimi alabilecek plastik malzeme elde edilir. Betonun diğer yapı malzemelerine kıyasla en önemli yararlarından biri, istenilen şeklin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Beton, karışımın hazırlanıp kalıba yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerinden sonra kısa sürede katılaşır ve zamanla dayanım kazanır [4].

Beton hangi amaç için üretilirse üretilsin, şu üç ana özelliğe sahip olmalıdır [6].

- ✓ Üretilen betonlar işlenebilir olmalıdır. İşlenebilirlik betonun bir özelliği olup, betonun kolay karıştırılabilmesi, yerleştirilebilmesi, taşınırken, karıştırırken ve yerleştirirken ayrışmaması, homojenliğini yitirmemesi gerekir.
- ✓ Üretilen beton kullanıldığı amaca göre öngörülen dayanıma sahip olmalıdır. Özellikle basınç dayanımı bakımından yeterli dayanımı sağlamalıdır.
- ✓ Üretilen beton dış etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Hava, su ve kimyasal çevrenin etkisiyle, donma-çözülme, ısı gibi fiziksel etkiler, betonun içyapısında agrega ile çimento arasında oluşabilecek tepkimeler sonucunda betonun dayanımını azaltır, geçirimliliğini arttırır ve parçalanmasına sebep olur. Bu nedenle beton, bütün bozulmalara karşı direnç göstermesi gerekir.

Daha genel bir ifadeyle betondan beklenen performans betonun şekil verilebilir olduğu plastik kıvama ve prizini alarak dayanım kazandığı durumlara göre ayrı ayrı incelenir[7].

2. PUZOLANLAR

Puzolanlar, tek başına kullanıldığında bağlayıcılığı olmayan fakat ince öğütülmesiyle ve uygun nemli ortamın ve optimum sıcaklığın sağlanmasıyla betonun karışımında bulunan çimentonun birtakım ekzotermik reaksiyonları sonucu serbest kalan kireç ile reaksiyona girmesi sonucu bağlayıcı özelliğe sahip bileşenler oluşturan silisli veya silisli-alüminli malzemelerdir [8].

Mineral katkı maddelerini orijinine (elde edildiği malzemenin kökenine) göre üç başlıkta toplamak mümkündür [3].

1. Doğal olarak elde edilen malzemeler (volkanik küller, traslar, diatomlu topraklar ve taş unu),
2. Endüstriyel yan ürün olarak elde edilen malzemeler (silis dumanı (SD), uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) vb.),
3. Isıl işleme tabi tutulmuş olan malzemeler (pişirilmiş kil ve şeyl vb.)

Betonda kullanılacak olan mineral katkı maddeleri mutlaka ince taneli olmalıdır. Yan ürün olarak elde edilen uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemeler gördükleri işlemler sonrasında ince taneli olan malzemelerdir. Fakat volkanik tüf, granüle yüksek fırın cürufu, pişirilmiş kil gibi bazı malzemelerin mineral katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için tanelerinin en az portland çimentosu inceliğinde olacak şekilde öğütülmeleri gerekmektedir [3].

Mineral katkı maddeleri betonu oluşturan temel malzemelerle birlikte karışımdan önce veya karışım esnasında karıştırılarak doğrudan kullanılabilir. Mineral katkı maddeleri genellikle çimento yerine belirli oranlarda ikame edilerek kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanımı betonun maliyetini de düşürmektedir [3].

Mineral katkılar taze ve sertleşmiş betonun birçok özelliğini değiştirebilmektedir. Taze betonun işlenebilirliğini, priz sırasında açığa çıkan ısı miktarını, alkali-silika reaksiyonu oluşma durumunu, durabilitesini, su geçirgenliğini, ilk günlerdeki ve nihai dayanımını, sülfatlara karşı dayanıklılığını ve maliyeti düşük

bir beton elde etmek gibi özelliklerini kullanılan katkının cinsine, kullanım miktarına ve puzolanik özelliklerine göre doğrudan etkilemektedir [3].

Beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılan puzolanlar, tek başına kullanıldıklarında eser miktarda bağlayıcılık özelliğine sahip olan veya hiç olmayan, su ile karıştırıldığında sertleşmeyen fakat ince öğütülerek uygun nem ve normal ortam sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksit (serbest kireç) ile kimyasal reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip bileşikler oluşturan malzemelerdir [9].

Puzolanlar, ilk olarak eski Romalılar devrinde Pozzuoli (Napoli) civarında görülen ve camsı içeriği fazla olan amorf yapıda piroklastik bir kayacı ifade etmektedir. Puzolan terimini bugünkü İtalya'da Vezüv yanardağı eteklerindeki Pozzuoli kasabasından almaktadır. Romalılar tarafından 2000 yıl önce bağlayıcılığı bilinen puzolanlar, Arrowrock Barajı, Rihine Nehri boyundaki su kanalı, Los Angeles'ta su kanalı, Oregon'da Bonneville Barajı, Saldenbach Barajı ve Neuwied Ren Köprüsünün ayakları gibi halen hizmet vermekte olan birçok yapıda kullanıldığı görülmektedir. Türkiye'de Çatalhöyük 'de bulunan tarihi yapılar üzerinde yapılan araştırmalarda kullanılan harcın, Roma döneminden çok daha önce de kullanıldığını ortaya koymuştur [10].

Puzolanlar çeşitli amaçlarla beton üretiminde veya çimento sanayiinde yaygın olarak kullanılmışlardır. Betonun taze ve sertleşmiş halleri için çeşitli faydalar sağlayan bu maddeler, sürdürülebilir yapı ve beton teknolojisinde betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek ve beton üretiminde maliyeti düşürmek maksadıyla kullanılmaktadırlar. Mineral katkı maddeleri olarak da bilinen bu katkı maddeleri portland çimentosuna benzer fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikler göstermesine rağmen yalnız başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özellikleri yoktur. Bu tür maddeler betonda temel bileşenlerden olmadığından ikincil bağlayıcı malzeme olarak da anılmaktadır. Efektif bir dolgu maddesi gibi davranan bu maddeler, puzolanik aktiflikleri sayesinde hidrasyon ürünlerinin oluşumuna yardımcı olarak bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özelliklerini daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını sağlayarak boşluk yapısını

doldurmaya çalışır ve agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını sağlarlar. Bir dezavantaj olmasına rağmen bunların çeşitli kimyasallarla birlikte kullanılmasıyla beton üretiminde yüksek dayanımlara erişilmesini mümkün kılabilir [11].

Bu puzolanik maddeler, kimyasal bileşimlerinin, reaktivitelerinin, parçacık büyüklüğü dağılımının ve parçacık şekillerinin bir sonucu olarak hidrasyonun ilerlemesini etkiler. Çimentoda katkı maddesi olarak kullanılan puzolanik malzemelerin uygulanabilirliği, SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi aktif bileşenlerin miktarı ile güçlü bir şekilde ilişkili olan puzolanik aktivite ile belirlenir [12].

2.1 Puzolanik Reaksiyon ve Puzolanik Malzemelerin Aktivitesi

Puzolanların bileşimi büyük oranda silis ve alüminden oluşmaktadır. İnce taneli olarak öğütülmüş bu katkılar, hidrate olmuş kireç ve su ile bir araya geldiğinde bu malzemeler arasında bir takım ekzotermik reaksiyonlar meydana gelmektedir. Hidrate olmuş kireç-silis-su arasında gerçekleşen bu kimyasal olaylar aynen Portland Çimentosunun hidrasyonunda olduğu gibi hidrolik bağlayıcılık özeliğine sahip kalsiyum-silika-hidrat (C-S-H) jellerinin oluşmasına yol açmaktadır. Başka bir ifadeyle puzolanik aktifliği işaret eden olay, kalsiyum hidroksit ile alümina silikatlar arasında gerçekleşen ve sonuç olarak bağlayıcılık kazandıran hidrasyon ürünlerini meydana getirmesidir. Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireç ve su ile hangi oranda reaksiyona girebileceği ve ne kadar bağlayıcılık özellik sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Yeterli miktarda puzolanik aktivite gösterebilmesi için bir puzolanın, tanelerinin en az portland çimentosu inceliğinde olması, camsı amorf yapıda olması ve yeteri miktarda “silis + alümin + demir oksit” içermesi gerekmektedir.

Bir puzolanın aktifliğini belirlemeye yönelik net bir deneysel yöntem bulunmaması ile birlikte önerilen bir takım fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler vardır. Yapılan araştırmalar sonucunda puzolan katkılı harç karışımları ile hazırlanan deney numunelerinin mekanik dayanımları, puzolanik aktivitenin ölçümü için en anlamlı kabul edilen yöntemdir. Bu yöntem kireç-puzolan karışımı ile hazırlanan

numunelerin basınç dayanımına dayanmaktadır. Hazırlanan numunelerdeki basınç dayanımının artışı puzolan tarafından bağlanan kireç miktarına bağlı olarak artmaktadır [8].

Puzolanik aktivite, ‘‘Dayanım aktivite indeksi’’ aşağıdaki denklem yardımıyla belirlenmektedir.

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = \left(\frac{A}{B}\right) * 100 \quad (2.1)$$

Burada,

A = Puzolan katkılı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B = Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Türk standartlarına göre doğal puzolanlar için yapılan dayanım aktivite indeksinin en az 70 olması istenmektedir [13].

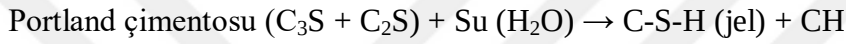
Puzolanik aktivite yani puzolan tarafından bağlanan kireç miktarı, puzolan içindeki aktif fazların yapısı ve miktarına, aktif fazlardaki SiO₂ miktarına, karışımın (kireç/puzolan) oranına ve uygulanan kür süresine bağlıdır. Ayrıca puzolanın özgül yüzey alanı, sıcaklık ve (Su/Katı madde) oranı kirecin bağlanma hızını doğrudan etkilemektedir [8].

Bir portland çimentosu ile puzolan karışımı arasında gerçekleşen temel puzolanik reaksiyon, portland çimentosunun su ile hidrolik reaksiyonları sonucu açığa çıkan sönmüş kireç ve alkalilerin, (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) oksitlerinin tepkimesiyle oluşmaktadır. Bu tepkimenin temelinde İki olay vuku bulur: birinci durumda, kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂) miktarında azalış görülürken, ikinci durumda ise portland çimentosunun hidrolik reaksiyonu sonucunda ürün olarak ortaya çıkanlara benzer C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) ve kalsiyum-alüminosilikat miktarlarında artış görülür. Çimento ve beton karışımı içerisinde daha çok bağlayıcı C-S-H jellerinin oluşumu ile çimento pastasındaki boşluklu yapının azalması halinde görülen puzolanik reaksiyonun, betonun geçirimsiz ve zararlı dış etkenlere karşı dayanıklı olmasını sağlarken daha çok bağlayıcı ürün oluşması ise mekanik

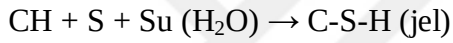
dayanımındaki artışın temel nedeni olduğu belirtilmektedir. Ayrıca puzolan içerisindeki amorf yapıdaki SiO_2 'in puzolanik aktivitesinden dolayı önemli bir bileşiktir. Bünyesinde bulundurduğu amorf yapıdaki silisyum dioksit (SiO_2) miktarı ile bağlayıcı C-S-H jelinin artış eğiliminde olduğu ve mevcut silisyum dioksit 'in amorf veya kristal yapıda olmasına göre gerçekleşen reaksiyonun hızının etkilendiği iyi bilinmektedir [14].

Bu reaksiyonlarla ilgili denklemler aşağıda verilmiştir [15].

Portland çimentosunun hidratasyonu;



Puzolanik Reaksiyon;



(Reaksiyonlarda kullanılan harfler Çimento kimyasında $\text{CaO}=\text{C}$, $\text{SiO}_2=\text{S}$, $\text{Ca}(\text{OH})_2=\text{CH}$, $\text{Al}_2\text{O}_3=\text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3=\text{F}$, $\text{H}_2\text{O}=\text{H}$ harfleri ile belirtilmektedir.)

Denklemlerde görüldüğü gibi Portland Çimentosunun hidratasyonun kireç ürettiği puzolanik reaksiyonların ise açığa çıkan kireci tükettiği görülmektedir [16].

Puzolanik reaksiyon serbest kireç oluşumunu beklemesinden dolayı portland çimentosunun hidratasyonuna göre oldukça yavaştır. Bu puzolanik etki nedeni ile dayanım kazanma hızı yavaş gerçekleşmekte ve açığa çıkan hidratasyon ısısı düşük olmaktadır. Buna bağlı olarak ilk yaşlarda mekanik dayanımı düşük seviyelerde seyrederken puzolanların aktifliğine bağlı olarak nihai dayanımı, referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir. Betonun kür sıcaklığının arttırılması, alkali ve sülfatlar gibi bazı kimyasal katkı ilaveleri puzolanik reaksiyonun hızı arttırılabilir [20, 21].

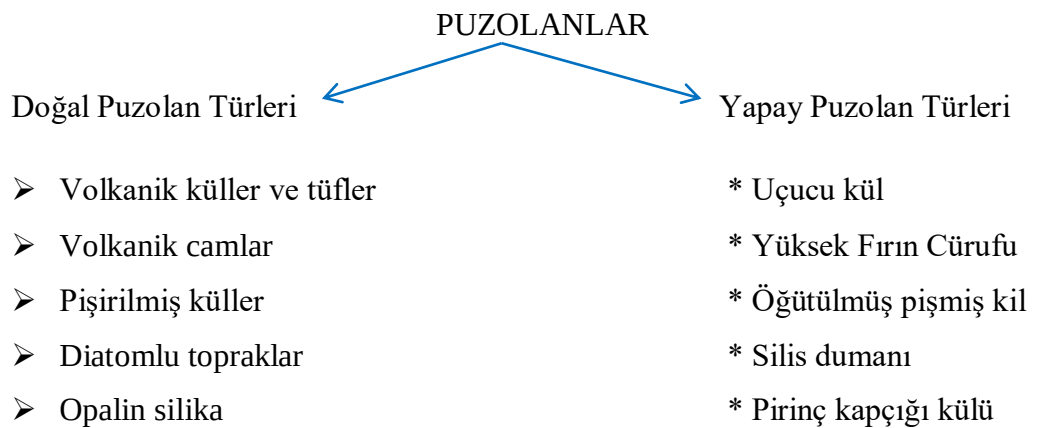
Kireç-puzolan arasında gerçekleşen reaksiyonlarda puzolan tipine göre değişmeksizin, Portland Çimentosunun hidrate olmasıyla ortaya çıkan ürünlerle benzer ürünler meydana gelmektedir. Olası farklılıklar oluşan ürünlerin yapısından çok miktarı ile alakalıdır. Kireç-doğal puzolan arasında gerçekleşen reaksiyonlar

sonucunda oluşan ürünler hakkında ortak bir görüş hâkimdir. Ayrıca oluşan ürünlerin varlığı puzolanın kimyasal yapısındaki bileşen yapısına (silikanın veya alüminyum kompozisyonlarının baskın olmasına), reaksiyon sonucunda oluşan serbest kirecin miktarına ve ortam sıcaklığı, nemin varlığı gibi çevresel etmenlere bağlı olarak değişmektedir. Bunlara bağlı olarak puzolan-kireç arasında gerçekleşen tepkimeler aynı ürünleri açığa çıkarmaz [16].

1. C-S-H miktarı ve oluşma hızı
2. C₄AH_x formunda kalsium alüminat hidrat oluşumu ($9 \leq x \leq 13$)
3. C₂ASH₈ - Hidrat gehlenit oluşumu
4. C₃A. CaCO₃ H₁₂ - Kalsiyum karboalüminat oluşumu
5. C₃A. CaSO₄. H₃₂ -Etrenjit Oluşumu
6. C₃A. CaSO₄. H₁₂ -Kalsiyum alüminat monosülfat

2.2 Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar elde ediliş şekillerine göre doğal ve yapay olmak üzere iki başlık altında aşağıda şematik olarak gösterilmiştir[19].



Şekil 2.1 Puzolanların Sınıflandırılması ve Türleri

2.2.1 Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, elde edilişinden itibaren az veya çok miktarda değişime uğramış volkanik kökenli doğal tortul kayalardan oluşan, ince öğütülerek söndürülmüş kireç ve su ile bir araya geldiklerinde çimento gibi bağlayıcı özellik gösteren silis ve alümin esaslı malzemeler olarak ifade edilmektedir. Doğal puzolanların bazıları ince öğütülerek kullanılırken bazıları ise işlem görmeden de kullanılabilir. Puzolanların betonda kullanılabilmesi için bileşimindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı minimum %70 olmalı, serbest kireç miktarı ise %4' den fazla olmaması istenmektedir [11].

Doğal puzolanlar, doğal olarak oluşan amorf yapıda silika içerir veya amorf silikayı elde etmek üzere işlem görmüş malzemelerdir. Puzolanların tek başlarına kullanıldıklarında puzolanik özellik gösteremezler. Ancak başka bir bağlayıcı ile (Çimento, kireç vb. gibi) karıştırılınca bu özelliği kazanırlar [20]. Volkanik orjinli bazı malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için öğütülmeleri gerekmektedir. Öte yandan, kil, şeyl ve diatomlu toprak, önce pişirilerek daha sonra da ince taneli duruma getirildiklerinde puzolanik özellik kazanarak hidrolik bağlayıcılık kazanabilmektedirler [3].

2.2.2 Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, kil şist gibi doğal maddelerin endüstriyel fabrikalarda kalsine edilmesi sonucu yan ürün olarak oluşan tek başına kullanıldığı zaman bağlayıcılığı olmayan fakat benzer hidrolik bağlayıcılarla öğütülüp karıştırıldığında bağlayıcılık kazanan silis veya silis-alümin esaslı puzolanlardır. Atık olarak değerlendirilen yapay puzolanlar da doğal puzolanlar gibi SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO vb. oksitlerden müteşekkil olur. Ancak bu oksitler belirli işlemlerden geçmesi sonucu olduğundan bunlara “yapay (suni) puzolan” olarak değerlendirilir. Bileşimindeki amorf (camsı) yapıdaki SiO_2 'in aktifliği ve çözünübilirliği puzolanın serbest kireci bağlama miktarının temel belirleyicisidir. Endüstri atığı olarak elde edilen puzolanlar, üretim artıklarından elde edilirler. Mesela demir çelik endüstrisinde atık olarak cüruf, termal elektrik santrallerinden pulverize (öğütülmüş) kömür ve fosil

yakıtların yakılması sonucu uçucu kül, metal silis ve silis alaşımlarının üretiminde kuvarsın yakılmasında atık olarak silis dumanı elde edilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan yapay puzolanlar; uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu hakkında kısaca bahsedilecektir [21].



Resim 2.1 Puzolan Türleri; Sağdan Sola: Kalsine Edilmiş Şeyl, Yüksek Fırın Cürufu, F Sınıfı Uçucu Kül, Silis Dumanı, Metakaolin, C Sınıfı Uçucu Kül [22]

Puzolanik katkılar içerisinde özellikle bu çalışmaya ışık tutması bakımından bazı yapay puzolanlar üzerinde daha ayrıntılı olarak durulacaktır.

Bunlar sırasıyla;

Uçucu Kül;

Uçucu kül, pulverize kömürün yakılmasıyla çalışan termik santrallerin egzoz gazlarından elektrostatik ya da mekanik yöntemlerle çökeltilmesi sonucu elde edilen küldür [23]. Pulvarize kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması ile elde edilen ergimiş malzemenin soğumasıyla kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Çok yüksek inceliği olan (0,5 ile 150 mikron arasında) küresel ve camsı parçacıklardan oluşan bu kül tanecikleri baca gazları ile birlikte sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [24].

Uçucu küllerin kimyasal yapısında bulunan temel oksitlerden

- ✓ SiO_2 % 25-60,
- ✓ Al_2O_3 %10-30,
- ✓ Fe_2O_3 %1-15,
- ✓ CaO , %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Verilen bu aralıklardaki farklı değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir [25].

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal yapılarında bulundurdıkları bileşen yüzdelere göre temel olarak kullanılan ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları referans alınmaktadır [27, 28].

ASTM C 618'e göre uçucu küller kimyasal yapılarında bulunan toplam ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) miktarına göre F, C ve N sınıflarına ayrılırlar:

- F sınıfı uçucu küller, normalde bu sınıf için geçerli gereklilikleri yerine getiren yanmış antrasit veya bitümlü kömürden üretilen ve yalnızca puzolanik özellik gösteren küllerdir. Kimyasal bileşenlerinde toplam ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) yüzdesi %70'den fazla olan küller bu sınıfa girmektedir. Ayrıca bu tip uçucu küllerde CaO miktarı % 10'un altında olduğundan düşük kireçli olarak da adlandırılmaktadır.
- C sınıfı uçucu küller, normalde linyit veya yarı bitümlü (hafif metal) kömürden üretilir. Puzolanik özelliklere sahip olmasının yanı sıra bağlayıcılık özelliklerine de sahip küllerdir. Kimyasal bileşenlerinde toplam ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) yüzdesi %50'den fazla olan bu küllerin CaO miktarı da %10'dan fazla olduğu için yüksek kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılmaktadır.
- N Sınıfı uçucu küller, bazı diatomlu topraklar gibi bu sınıf için geçerli gerekliliklere uyan ham veya kalsine edilmiş veya kalsine edilmemiş tüfler ve volkanik küller, bazı killeri ve şeyiller bu sınıfa girmektedir. Bu sınıfta bulunan küllerde de F sınıfında olduğu gibi Kimyasal bileşenlerinde toplam ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) yüzdesi %70'den fazla olması gerektiğinden bahsedilmiştir.

TS EN 197-1'e göre yapılan sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki başlık altında sınıflandırılmıştır.

- Silissi uçucu küller (V), kimyasal bileşeninin temelini reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) oluşturduğu bunlarla birlikte bünyesinde demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşikler de ihtiva eden, toz halinde küresel parçacıklardan ibaret olan çoğunlukla puzolanik özelliklere sahip uçucu küllerdir. Ayrıca reaktif SiO_2 muhtevası kütlece % 25'den reaktif CaO oranı ise kütlece % 10'dan az olmamalıdır.
- Kalkersi Uçucu Küller (W), kimyasal yapısının temelinde reaktif kalsiyum oksit (CaO), reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)'den oluşan puzolanik özellikleri ile birlikte hidrolik bağlayıcılığı da olan uçucu küllerdir. Bu tip küllerde de, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması istenmektedir.

Silis Dumanı;

Silis Dumanı, silisyum metalinin veya Ferro-Silisyum alaşımlarının üretiminde elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarsın yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömürle redüklenmesi sonucu elde edilen endüstriyel bir atık malzemedir. Çevrenin kirlenmesini önlemek amacıyla elektro filtreler yardımıyla filtrelenen Silis Dumanı, yüksek oranda (%85-%99) amorf yapıya sahip silis minerali içermektedir. Tanecik boyutları Portland çimentosunun taneciklerine kıyasla 100 kat daha küçük olan Silis Dumanının ortalama tanecik çapı 0,1-0,2 µm arasındadır. Bu tanecikler kristal olmayan, amorf, küresel ve camsı silis (SiO_2) parçacıklarından oluşmaktadır. "Mikrosilis" veya "Silis Tozu" olarak da anılan silis dumanı, bileşimindeki toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının yüksek olmasından dolayı yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Birim ağırlığı 130-430 kg/m³, ortalama özgül ağırlığı ise 2,2-2,3 gr/cm³ arasında değer almaktadır. Silis dumanı içeriğindeki karbon miktarına göre açık griden koyu griye giden renge sahip düzgün yüzeyli ve küreseldir. Ayrıca özgül alanı 300-500 m²/kg olan portland çimentosuna göre çok

daha ince taneciklere sahip olması sebebi ile ($2000 \text{ m}^2/\text{kg}$) çok daha yüksek yüzey alanına sahiptir [30, 31].

Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve doğal puzolanlar gibi ilave mineral katkı malzemelerinin kullanımı, beton teknolojisi açısından sağladığı teknik ve ekonomik avantajları nedeniyle teşvik edilmektedir.

Silis dumanının çok ince taneli amorf taneciklerden oluşmuş olması ve yüksek oranda SiO_2 içermesi gerek ilk zamanlarda veya nihai olarak oldukça yüksek dayanımlı betonların elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca silis dumanının kullanımı taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltması ve karışım suyunu arttırmasından dolayı beton karışımına ilave olarak su azaltıcı katkı maddesi kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Yüksek dayanım ve dayanıklılık gereken durumlarda Silis dumanı katkılı betonlar kullanılmaktadır. İlk ve nihai dayanımının yüksek olmasından dolayı prefabrik olarak inşa edilen yapılarda, zararlı kimyasallara veya ağır aşınmaya maruz betonlarda, her türlü yüksek performanslı yapılarda ve deniz yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır [32].

Yüksek Fırın Cürufu;

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik üreticilerinin demir cevherinden demir üretimi sırasında pik demiri ham demir cevherinden ayırırken hafif olması sebebiyle ham demir üzerinde kalan malzemeye yüksek fırın cürufu denmektedir. $1500\text{-}1600^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki eriyik halde bulunan cüruf $\%30\text{-}\%40$ oranında SiO_2 ve $\%40$ oranında CaO içerir. Bu bileşim Portland çimentosunun kompozisyonu ile benzer özellik göstermektedir. Cüruf çimento üretiminde bazı işlemler sonucunda kil yerine, beton üretiminde agrega yerine ikame edilerek ve bağlayıcı maddelerle birlikte öğütülüp (Portland çimentosu, kireç, alçı) karıştırılarak değerlendirile bilinmektedir [29]. Kalsiyum oksit (CaO), magnezyum oksit (MgO) ve silisyum dioksit (SiO_2) ihtiva eden Yüksek Fırın Cürufu, demir filiz gangi, kireç ve kok taşının yakılması sonucunda elde edilen ve soğutma yöntemine bağlı olarak puzolanik özellik gösteren atık bir üründür [30]. Ancak, eriyik cüruf, su içerisine dökülerek çok hızlı soğumaya

tabi tutulursa, hem irili ufaklı kum taneleri boyutunda granüle duruma gelmekte hem de büyük oranda amorf (camsı) yapı kazanmaktadır. Eriyik cürufun çok hızlı soğutulma işlemi, çok büyük miktarlarda basınçlı su püskürtülmesiyle de yapılabilmektedir.

Yüksek fırından elde edilen eriyik haldeki cürufun hava vasıtasıyla soğutulması durumunda, soğumanın yavaş hızda gerçekleşmesinden dolayı cüruf kristal yapıya sahip olmakta ve puzolanik özellik göstermemektedir. Ancak, ergimiş haldeki cürufun su yardımıyla çok hızlı bir şekilde soğutulması ile irili ufaklı tane boyutlarında granüle yüksek fırın cürufu elde edilmektedir. Granüle yüksek fırın cürufu, ince bir toz haline getirilip uygun şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık özelliği gösteren camsı kum benzeri bir malzemedir [23].

Cüruf katkılı betonun ilk günlerdeki dayanımı, cüruf taneciklerinin inceliğine ve miktarına bağlı olarak Portland çimentolu betona kıyasla daha düşük olduğu görülürken; nihai dayanım ve betonun işlenebilirliği uzun süreli ve düzenli küremeye tabi tutulmuş Portland çimentosundan üretilmiş betona göre önemli artış gösterdiği gözlenmiştir. Genel olarak cüruf katkısının % 70'in üzerinde olduğu çimentolarda ilk günlerdeki dayanımları daha çok cüruf reaktivitesine etki ederken daha az cüruf ikame edilmiş çimentolarda ise daha çok klinker (farin) özelliklerinin etkisine bağlı olduğu görülmüştür [31].

Cürufllu çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince olmasına cürufun ise daha iri taneli kalmasına sebep olur. Ayrı öğütme işlemi sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur.

Cüruf katkısının % 65 olduğu bir cürufllu çimento ile 28 günlük dayanımının benzer olduğu ve inceliklerinin ($3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) yakın olduğu bir portland çimentosuyla kıyas edildiğinde ilk günlerdeki dayanımı portland çimentosunun daha ileri yaşlardaki dayanımının ise cüruf katkılı çimentonun sahip olduğu görülmektedir [32].

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Erdoğan ve Erdem [33] yaptıkları bu çalışmada, özel bir kür yöntemi olarak bilinen buhar kürü yönteminde bekleme süresi olarak belirlenen zaman diliminin beton özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Genel anlamda betonun ilk dayanımının yüksek, nihai dayanımının ise kabul edilebilir düzeye ulaşmasının sağlanması açısından betona uygulanacak buhar kürünün sıcaklığının yüksek tutulması gerektiğinden bahsetmiş ve buhar kürü uygulamasını 4 ara evreden teşkil etmiştir. Bu evreler; bekleme, kontrollü sıcaklık artışı, sabit maksimum kür sıcaklığı ve kontrollü soğuma evresidir. Yaptıkları bu çalışma sonucunda, bekleme süresinin priz başlama süresinden daha kısa tutulduğu takdirde beton dayanımının beklenilenden daha düşük seviyelerde kaldığı sonucuna varmışlardır.

Alabaş [34], yaptığı yüksek lisans çalışmasında buhar kürü uygulamasının beton basınç dayanımına etkilerini değişik ısı işlem süreçlerinde irdemiştir. Bu çalışmada, buhar kürü için 65°C ve 85°C olmak üzere iki farklı kür sıcaklığı ve 4, 8, 16, 24 ve 36 saat olmak üzere beş farklı kür periyodu kullanılarak, 168 adet 15*15 cm. küp numunelere basınçlı buhar kürü uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, 3, 7 ve 28 günlük şahit numuneler üzerinde uygulanan 65°C ve 85°C'lik buhar kürü çevrimleri basınç dayanımlarında %3-5 arasında bir artışa sebep olmuşlardır. 65°C kür sıcaklıklarında kür süresinin artmasıyla dayanımda artış, 85°C sıcaklıklarda ise belirli bir kür süresinden sonra ise dayanımda düşüşler gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kısa kür periyodu uygulanan numunelerde 85°C sıcaklıklarda dayanım değerleri %10 daha fazla olduğu görülmektedir. Artan kür periyodu ve çevrim sıcaklığıyla olgunluk değerinin de artması ile basınç dayanımlarının belirli bir pik değerden sonra düşüşe geçtiğini ifade etmiştir.

Türkel ve Alabaş [35], Aşırı buhar kürlenmesinin kompozit Portland çimento betonu üzerine etkisini araştırdıkları bu çalışmalarında, kompozit çimento ile üretilen betonun özelliklerini, buhar kürü altında kürlenmiş 42,5 R Portland çimento ile üretilmiş betonun özellikleri ile kıyaslamışlardır. Bu amaçla bütün numunelerde sabit 400 kg/m³ çimento dozajı ile su/çimento oranı 0.44 olan 15*15*15 cm ebatlarda

numuneler hazırlanarak 65 ve 85 °C sıcaklıklarda 4, 8, 16, 24 ve 36 saat sürelerle buhar kürüne tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak; kompozit Portland çimentosunun klasik PÇ 42.5'in yerine prekast beton üretiminde atmosferik basınçta buharla kürleme için kullanılabileceğini göstermiştir. Ancak üretilen prekast elemanların kalıptan erken çıkarma amacıyla kısa sürede yüksek dayanım talep edilmesi durumunda, buharla kürleme sıcaklığı, her iki çimento tipi ile üretilen betonlar için de 85 °C'ye yükseltilmesi önerilmiştir.

Karabulut [36] yaptığı bu yüksek lisans çalışmasında, basınç dayanımları 200-800 MPa aralığında olan reaktif pudra betonunun, uygun agrega tipi ve granülometriye sahip karışım oranları ile hazırlamış ve üretilen mineral katkı numunelerin (silis dumanı, yüksek fırın cürufu vb.) otoklav kürü altında uygulanan kürle basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında yüksek basınçlı buhar (otoklav) kürü gibi hızlandırılmış kür yöntemlerinin en uygun kür rejimleri araştırılmıştır. Çeşitli ikame oranlarında mineral katkı karışımlar oluşturularak farklı kür koşullarının (yüksek basınçlı (otoklav) buhar kürü, buhar kürü ve standart kür) mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Bu çalışma ile mineral katkı kullanımının reaktif pudra betonunda, çimento ve silis dumanı katkısının azaltılabileceği, taze betona uygulanan basınçlı sıkıştırmanın daha yüksek dayanımlarda daha fazla kimyasal akışkanlaştırıcı katkı ikameleriyle uygun karışımlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Uygunoğlu ve Ünal [37], pomza hafif agregası ile ürettikleri hafif beton harçlarını otoklav kürüne tabi tuttuktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini irdelemişlerdir. Ürettikleri sabit su/çimento oranına (0.15) ve 300 kg/m³ çimento dozajına sahip numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarıldıktan sonra beş farklı sürelerle (2, 4, 6, 8 ve 10 saat) yüksek basınçlı (otoklav) buhar kürüne tabi tutmuşlardır. Aynı üretim koşullarında 7 ve 28 günlük havada ve suda kür edilmiş numunelerde hazırlanarak fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuşlardır. Elde edilen veriler ışığında otoklav kürü ile havada ve suda kür edilen numunelerin deney sonuçları kıyaslanmış ve pomza hafif agregası ile üretilen harçların 8-10 saat otoklav kürüne tabi tutulanların daha iyi performans sergilediği sonucuna varmışlardır.

Demir ve ark. [38], yaptıkları çalışmada, puzolanik özelliklere sahip Seyitömer uçucu külü ve Afyonkarahisar yöresi bazı traslarla hazırlanan numunelere 3 farklı kür uygulamışlardır. 7 ve 28 günlük su kürleri ve ayrıca 8 saatlik otoklav kürü uygulanan numunelerin fiziksel özellikleri ve basınç dayanımları belirlenerek dayanım aktivite indekslerini irdelemişler. Beton ve çimento üretiminde kullanılabilirliği araştırılan örneklerin yeterli kür koşullarına tabi tutuldukları taktirde puzolanik katkı olarak kullanılabileceği kanısına varmışlardır.

Binici ve ark. [39], betonda ince agrega yerine yüksek fırın cürufunu ve granüle bazaltik pomzayı hem ayrı ayrı hem de birlikte kullanmışlardır. Deniz suyunda bekletilen örneklerin kimyasal aşınmaları, basınç dayanımları ve mikro yapıları incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu ve granüle bazaltik pomzanın basınç dayanımına ve kimyasal aşınmaya olumlu katkıları olmuştur. Katkılı numunelerin erken dayanımlarının düşük olduğu tespit edilmiş, daha sonraki dayanımları ise yüksek çıkmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, deniz içerisinde inşa edilecek, sülfat ve tuz etkisinin bulunduğu yapıların beton üretiminde granüle bazaltik pomza ve yüksek fırın cürufunun ince agrega yerine kullanılabileceğini ve beton durabilitesini geliştirebileceğini ortaya koymuştur. Bu sayede kimyasal ve fiziksel bozulmaların önüne geçilebileceği, etki düzeyinin azaltılabileceği ve kütleli kayıpların azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kotan [40], yaptığı bu çalışmada, pomzanın hafif agrega olarak kullanıldığı hafif betonların atmosferik basınçlı buharla kür edilmesinden sonra fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla, Pasinler–Demirdöven yöresinden elde edilen pomza kullanılarak 400 Kg/m^3 sabit dozaja sahip numuneler üretilmiştir. Hazırlanan numuneler standart su, hava ve atmosferik basınçlı buhar kürü olmak üzere üç farklı küre tabi tutulmuştur. Standart su ve hava kürüne tabi tutulan numunelere 7, 14 ve 28 gün olmak üzere üç farklı süreyle kür işlemi uygulanmıştır. Buhar kürü ile kütleme işlemi ise, 3, 4 ve 5 saatlik ön bekleme süreleriyle, 60, 70 ve 80°C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı kür süresi (8, 12 ve 16 saat) için basınçsız buhar kürüne maruz bırakılmıştır. Bu kütleme prosesine tabi tutularak dayanım kazanan beton numunelerine, basınç ve eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı,

statik elastisite modülü ve ısı iletkenlik gibi deneyler uygulanarak fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi ile gerilme–birim deformasyon ilişkileri irdelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, üretilen pomza agregalı hafif betonlarda standart su ve hava kürü için süre arttıkça yapılan fiziksel ve mekanik test sonuçlarında değerlerin arttığı gözlemlenmiştir. Buhar kürü numunelerinde ise, ön bekleme ve kür sıcaklığı, kürleme rejim süreleri arttığında yapılan deney sonuçlarında da artışlar gözlenmiştir. Farklı sıcaklık ve sürelerde beton numunelerine uygulanan buhar kürleme yönteminin 28 günlük su kürü numunelerinden elde edilen dayanımın %94'üne ulaşılacağı sonucuna varmıştır.

Türken [41], Katkısız ve katkılı betonlarda farklı kür malzemelerinin beton basınç dayanımına etkisini incelediği bu çalışmada, C25 sınıfı beton dayanımı referans alınarak katkısız şahit numuneler ve 4 farklı katkı ilavesinin kombinasyonları ile 15*15*15 boyutlara sahip numuneler hazırlanmıştır. Üretilen farklı içeriğe sahip numuneler, hem standart su kürüne tabi tutulmuş hem de dört farklı kür malzemesiyle kür edilmiştir. Üretilen bu numunelerin tabi tutuldukları kür yöntemlerine göre beton basınç dayanımındaki değişimler gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile standart su kürüne tabi tutulan farklı karışım oranlarında üretilen beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinin, diğer uygulanan kür yöntemlerine oranla daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Farklı kimyasal kür malzemelerinin farklı beton karışımları için değişik sonuçlar ortaya çıkardığı görüldüğünden uygulama sırasında kullanılacak beton karışımına göre kimyasal kür malzemelerinin denenip hedeflenen dayanıma göre seçim yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sharıfı [42], bu yüksek lisans çalışmasında, buhar kürüne tabi tutulmuş uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların donma-çözülme direnci üzerine etkisini incelemiştir. FNARC komitesi standartlarına göre 500 kg/m³, 550 kg/m³ ve 600 kg/m³ toz miktarlarına sahip kendiliğinden yerleşen beton numune serileri üretmiş ve farklı oranlarda uçucu kül ikame ettiği toplamda 15 üretim yapmıştır. Üretilen numunelerin bir kısmına yumuşak çevrim buhar kürü diğer kalan kısmına ise standart su kürü uygulamıştır. Ayrıca üretilen numunelere kür tipine göre 100 donma-çözülme çevrimlerine tabi tutarak 25 çevrimde bir ağırlık ve ultrases geçiş hızları

kontrol edilerek 1 ve 28 günlük basınç dayanımları şahit numunelere göre kıyaslamıştır. Elde edilen veriler ışığında uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonlara uygulanan buhar kürleri sonunda bir günlük iken 28 günlük dayanımlarının %40-60'ına ulaşmış fakat standart su kürüne tabi tutulmuş numunelerin 28 günlük dayanımlarına kıyasla daha düşük seviyelerde kaldığını tespit etmiştir. Bu çalışmada üretilen uçucu kül katkılı numunelerde katkı oranı arttıkça buhar kürü uygulamasıyla betonun daha az zarar gördüğü ve ikame oranı %40 olan numunelerin donma-çözülme etkisine karşı daha dayanıklı olduğunu tespit etmiştir. Üretilen bütün kendiliğinden yerleşen beton numunelerde donma-çözülme çevrimleri sonrasında önemli oranlarda ağırlık ve ultrases geçiş hızı değişimi gözlenmediğini vurgulamıştır.

Yenidünya [43], çelik tel fiberli ve kimyasal katkılı betonların mekanik dayanımlarına etkisini incelediği bu yüksek lisans çalışmasında, ürettiği C20 ve C35 olmak üzere her iki sınıf için ayrı ayrı 25 kg/m³ ve 40 kg/m³ çelik tel fiber katkılı beton numuneleri hazırlamıştır. Bu numuneler üzerinde su, hava ve buhar kürü olmak üzere 3 farklı kür uygulamış ve buhar küründe 65 C⁰ ve 85 C⁰ olmak üzere farklı iki maksimum sıcaklığına tabi tutarak çelik tel fiber içeren beton dayanımına buhar kürünün etkisini incelemiştir. Bu çalışmada uygulanan buhar küründe nihai dayanımları kıyaslandığında C35 sınıfı betonların C20 sınıfı beton sınıfı numunelerine kıyasla basınç dayanımlarını arttırdığını gözlemlemiştir. Buhar kürüne tabi tutulan numunelerde ise 85 C⁰ maksimum sıcaklık değeri uygulanan örneklerin 1 günlük buhar kürüne tabi olan numunelerin basınç dayanımlarının 7 ve 28 günlük numunelere göre daha yüksek değerler elde etmiştir. Buna bağlı olarak maksimum kür sıcaklığı değerinin (85C⁰) yüksek olmasının nihai dayanımı düşürdüğü fakat betonun erken dayanımı kazanmasında etkili olduğu kanısına varmıştır.

Alawad ve ark. [49], Otoklav kürünün granüle yüksek fırın cürufu ile öğütülmüş kumun harmanlanmasıyla elde edilen çimento karışımının mikro yapısına etkisini inceledikleri bu çalışmada, bağlayıcı malzeme olarak öğütülmüş kum ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren otoklav kürü karışımların morfolojik, mineralojik ve termogravimetrik analizlerini incelemişlerdir. Hazırlanan

numunelerde hidratlanmış ürünlerin mikroyapı analizleri, taramalı elektron mikroskopisi (SEM), enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX), diferansiyel ısı analiz (DTA), termo-grafik analizi (TGA) ve X-ışını difraksiyonu (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Elde ettikleri SEM ve EDX sonuçları, ince levha benzeri kalsiyum silikat hidrat levhaların ve sıkıştırılmış bir mikro yapının oluşumunu göstermiştir. DTA ve TGA analizleri, hidratasyon bağlayıcı maddelerden üretilen kalsiyum hidroksitin, ikincil puzolanik reaksiyon sırasında tüketildiğini ortaya koydu. Bütün karışımların XRD analizlerinde kristalimsi silis gözlenmiş ve bunun da mikro yapıdaki fazla silisin varlığından kaynaklandığı tespitinde bulunmuşlardır. Harmanlanmış karışımların basınç dayanımı ile bağlayıcı malzemelerin $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ oranı arasında iyi bir korelasyon olduğu sonucuna varmışlardır.

Günaydın ve ark. [44], basınçlı buhar kürünün mineral katkılı betonlara etkisini araştırdığı bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda ($110-145-165^\circ\text{C}$) ve farklı basınç ($2-4-6$ bar) değerlerinde % 15 oranlarında mineral katkı ikameli betona basınçlı buhar kürü uygulamışlardır. Uygulanan kür rejimleri sonrasında dayanım kazanan numunelere fiziksel ve mekanik testler uygulamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, en iyi mekanik değerler 145°C sıcaklık ve 4 bar buhar basıncı altında kürlen numunelerde belirlenirken, basınçlı buhar kürünün mineral katkılı betonların dayanımında bir azalmaya neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Günaydın ve Güçlüer [45], Mineral katkılı betonların basınçlı buhar kürü etkisi altında mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelendiği bu çalışmada, üç farklı sıcaklık ve basınçta beton numuneler küre abi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre, basınçlı buhar kürü mineral katkılı betonların dayanımında düşüşe sebep olurken en iyi mekanik değerler 145°C sıcaklık ve 4 bar buhar basıncı altında kür edilen numunelerde tespit edilmiştir.

Kıllı [46], yaptığı yüksek lisans çalışmasında kür şartlarının çimento bulamacı enjekte edilmiş lifli beton (SIFCON)'un mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla ilk olarak SIFCON bulamacı tasarımı yapılmış ve iki farklı bağlayıcı oranında Uçucu Kül (UK) ve Yüksek Fırın Cürufu (YFC) içeren bulamaç

karışımlarının üzerinde dayanım deneyleri yapılarak en uygun karışım oranları belirlenmiştir. Tasarlanan karışıma iki farklı narinlik oranına sahip çelik lifler ilave edilerek, %4 ve %8 oranında çelik lif içeren SIFCON serileri hazırlanmıştır. Daha sonra üretilen numuneler standart, kuru ve hızlı kür yöntemlerine tabi tutulmuşlardır. Kürleme işlemleri sonrasında SIFCON numuneler üzerinde basınç, eğilme ve darbe dayanımı, ultrases geçiş hızı, kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda en uygun kür yönteminin standart kür yöntemi olduğu ve en iyi eğilme dayanımının narinlik oranı 55 olan %8 çelik lif ilave oranlarında sağlandığı görülmüştür.

Güçlüer ve Günaydın [47], bu çalışmada, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül puzolanik katkılarını % 10, 20 ve 30 gibi üç farklı oranda çimento ile ikame ederek beton numuneleri üretmişlerdir. Hazırlanan beton karışımları laboratuvar koşullarında 7, 28 ve 90 gün boyunca kürledikten sonra basınç dayanımı açısından teste tabi tutulmuştur. Elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre silis dumanı katkılı serilerdeki en yüksek dayanım değeri % 10 katkılı serilerde gözlenmiştir. Fakat % 20 ve % 30 silis dumanı ilaveli serideki basınç dayanımlarında düşüşler görülmüştür. Silika dumanının çimentodan daha ince olması, çimento - agrega yapışmasını olumsuz yönde etkilemiş ve mukavemet kaybına neden olduğu kanısına varmışlardır. Ayrıca numunelerden alınan kesitler üzerinde SEM analiz tekniği kullanılarak mikroyapı çalışmaları yapılmış ve dayanım değerleri ile mikro yapı bulguları arasındaki ilişkiler kurulmaya çalışılmıştır. Uçucu kül katkılı serilerde basınç dayanımı sonuçlarındaki düşüşün mikro yapısında gözlenen etrenjit oluşumundan kaynaklandığı sonucuna varmışlardır. Ultrases geçiş hızı sonuçlarına göre ise tüm seriler kaliteli beton sınıfında olduğu görülmüştür.

Liu ve ark. [48], tarafından yapılan bu çalışmada, iki farklı kürleme rejiminin (buharla kürleme ve otoklavla kürleme) uçucu kül ikame edilmiş ön gerilmeli yüksek dayanımlı beton (PHC) boru kazıklarının dayanıklılığı ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışma kapsamında bu iki kürleme rejimiyle PHC boru elemanlarının klorür penetrasyonu, tuz ve don direnci performansları test edilmiştir. Sonuç olarak 4,5 saat boyunca 85 ° C'de buharla kür edilmiş numunenin klorür iyon

geçirgenlik katsayısının, otoklavla kürlenmiş olana kıyasla % 97.13 oranında azaldığını ve bu buharla muamele edilmiş numunenin 150 kez tuz korozyon testlerine 550 kez de donma-çözülme testlerine dayanabileceğini tespit etmişlerdir. Üç farklı su/bağlayıcı oranına sahip numunelerin (0.21, 0.23, 0.25), gözenek ve mikro yapısal çatlak analizleri yapıldığında buharla kürlenmiş numunenin ortalama toplam porozite değerlerinin yaklaşık % 5 olduğunu ve bu da otoklavla kür edilmiş numunelerin porozite değerlerinin yarısından az olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışma ile elde ettikleri sonuçlara göre karışım oranını ve kür rejimini optimize ederek PHC boru elemanlarının yeterli mekanik ve dayanıklılık performanslarıyla hazırlanabileceğini göstermişlerdir.

4. BETONUN KÜR EDİLMESİ

4.1 Beton Üretiminde Kürün Tanımı ve Temel Gereksinimleri

Betonun bakımı ya da başka bir deyişle kürlenmesi, bir beton karışımının kalıbın içine yerleştirilmesinden hemen sonra çimento hidratasyonunu, yani zaman, sıcaklık ve nem koşullarını destekleyen koşulların bir kombinasyonunu içerir. Sertleşmiş betonun ileri yaşlarda yeterli mukavemet ve dayanıklılık özelliklerinin sağlanması için erken nem kaybı ve olumsuz sıcaklıklardan korunması gerektiği kabul edilir [49]. Belirli bir Su/Çimento oranında, hidratlanmış bir çimento pastasının boşluk yapısı (gözenekliliği), çimentonun hidratasyon derecesi ile belirlenir. Normal sıcaklık koşulları altında, bazı çimento bileşenlerinin bir kısmı su eklendiğinde hemen hidratlaşmaya başlar, ancak hidratasyon ürünleri susuz çimento tanelerini kapladığında hidratasyon reaksiyonları önemli ölçüde yavaşlar. Bunun nedeni hidratasyonun sadece doyma koşulları altında tatmin edici bir şekilde ilerleyebilmesidir. Bu nedenle zaman ve nem, hidratasyon işleminde su difüzyonu tarafından kontrol edilen önemli faktörlerdir [50].

İyi bir kürlemenin beton elemana kazandırdığı özelliklerle beraber yapısal elemanların ne kadar süreyle kürlenmeleri gerektiği de önem arz etmektedir. Normal dayanım hedeflenen beton için en az 7 gün, yüksek dayanımlı beton için en az 3 gün süren küre tabi tutulmaları gerektiği şeklinde genel bir kanı vardır. Elbette, kürlenme sıcaklığı ve hidratasyonun hızı ve özel çimentolu malzemelerin puzolanik reaksiyonları, belirli bir olgunluk seviyesine ulaşmak için gereken kürlenme süresini etkileyecektir.

Betonun kür edilmesine temel olan kürün temel gereksinimleri kısaca aşağıda değinilmiştir. Bunlar;

Yeterli su içeriği, uygun kürleme, çimento pastasında uygun nem içeriğinin muhafaza edilmesini içerir. Bu gereksinim birçok farklı kürleme metodu veya çeşitli metotların birlikte kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir [49].

Kürleme süresi boyunca beton sıcaklığı, yeterli sıcaklık muhafaza edilerek sabit bir değerde tutulmalı ve yüksek sıcaklıklardan korunmalıdır. Belirtildiği gibi, erken yaşlarda yüksek sıcaklıklar uzun vadeli özellikleri etkileyebilir.

Beton gövdesi boyunca makul derecede homojen sıcaklığın korunması ve betonun kullanım ömrü boyunca maruz kalacağı ortalama sıcaklığın birkaç derece altında sabit bir sıcaklıkta kürlenmesi, betonun çatlama riskini azaltır [49].

Herhangi bir taze beton yapı, betonun erken kürlenme sırasında dayanımını kazandığı için; ağır yüklerden, büyük gerilmelerden, darbelerden ve aşırı titreşimlerden korunmalıdır. Betonun dayanım kazanma süreci, mikro yapının gelişmeye başladığı kritik erken yaş döneminde önemli mekanik hasarlara maruz kalması durumunda zarar görebilir. Erken yaşta oluşan hasar, betonun öngörülen dayanım ve dayanıklılığa ulaşmasını engelleyebilir [50].

Hedeflenen özelliklere sahip beton üretebilmek için, hidrasyonun yeterli derecede gelişmesi adına yeterli zamanın olması gerekir. İhtiyaç duyulan zaman miktarı, betonun kürlenme sıcaklığına, çimento tipine ve çimento hamurunun nem içeriğine bağlı çeşitli değişkenlere bağlıdır.

Bu tez çalışmasında kürleme için temel gereksinimlerin esas alındığı, basınçlı buhar kürü ve sıcaklık değişimleri altında mineral katkılı betonların dayanım değişimleri incelenecektir. Hızlandırılmış kür yöntemleri, yüksek basınçlı buharla kürü, atmosferik basınçta buhar kürü (ısı ve nem veya diğer kabul edilmiş işlemleri de kapsayan kür rejimleri) gibi betonun dayanım kazanmasını hızlandırmak ve sertleşme süresini azaltmak için kullanılmaktadır. Hızlandırılmış kür yöntemleri, prekast beton elemanların üretiminde daha sık kullanılmasına rağmen, hızlandırılmış kürleme uygulamaları yerinde dökme beton için de kullanılabilmektedir. Hızlandırılmış kür yöntemlerinde, sertleştirme işlemi sırasında nem kaybının artması potansiyeli ve uzun vadeli yüksek sıcaklık uygulanmasından kaynaklanan olası zararlı etkiler dikkat edilmesi gereken önemli hususlardır [51].

4.2 Betona Uygulanan Kür Yöntemleri

Kür, betonun yerleştirilmesinden hemen sonraki dönemde doygun bir nem içeriğini ve optimum sıcaklığı muhafaza etme işlemi olarak tanımlanabilir. Bu muhafaza sağlandığı takdirde beton, servis ömrünü karşılayabilecek yeterli dayanım ve dayanıklılığa ulaşıncaya kadar çimento hidratasyonu devam edebilir. Betonun kürlenmesi, betonun mikroyapı ve gözenek yapısının geliştirilmesinde önemli bir rol oynar. Termal büzülme çatlaklarını önlemek için sıcaklık beton derinliği boyunca homojen bir şekilde korunmalıdır. Kürleme hidratasyonun erken döneminde ihmal edilirse, betonun kalitesi zarar görecektir [52].

Betonun kür edilmesi, uygulama şekillerine göre şöyle sıralanabilir.

4.2.1 Su İle Uygulanan Kür Yöntemleri

Bu yöntem, betonun kürlenmesi için hidrasyonun teşviki, büzülmenin giderilmesi ve hidratasyon ısısının emilmesi gibi temel tüm gereksinimlerini karşıladığı için en iyi kürleme yöntemidir. Membran kaplama yöntemi günümüzde betonun kürü için daha çok benimsense bile, beton membranlarla kaplanmadan önce belli bir miktarda su kürünün yapılmasına ihtiyaç duymaktadır [52].

Su ile yapılan kürleme çeşitleri aşağıdaki şekillerde yapılabilir:

- Göllendirme ve daldırma,
- Püskürtme ve sisleme,
- Islak kaplamalar,
- Geçirimsiz kâğıt kaplama,
- Plastik levhalar ile kaplanarak yapılabilir.

4.2.2 Membran (Zar) Oluşturan Sıvı Bileşikleri İle Kür Yöntemleri

Mumlardan, reçinelerden, klorlanmış kauçuktan ve diğer malzemelerden oluşan sıvı membran oluşturuıcı bileşikler, betondaki nemin buharlaşmasını geciktirmek veya azaltmak için kullanılabilir. Bu yöntem, yerine yeni yerleştirilmiş veya kalıpları sökülmüş betonun nemli ilk kürlenmesinden sonra

betonun kür süresini uzatmak için en pratik ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Bununla birlikte, betonun en etkili kürleme yöntemleri, betonun sürekli nemli kalmasını sağlayan ıslak kaplamalar veya su püskürtme yöntemleridir. Zar oluşturan kür bileşikleri, çimento hidrasyonunu sağlamak için beton yüzeyinin bağıl nemini en az yedi gün boyunca % 80'in üzerinde tutabilmelidir [51].

4.2.3 Isıl İşlemlerle Uygulanan Kür Yöntemleri

Betonun dayanımının gelişimi sadece zamanın değil aynı zamanda sıcaklığın da bir fonksiyonudur. Beton daha yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, hidrasyon sürecini hızlandırır ve daha hızlı dayanım geliştirir. Nemlendirme sürecini hızlandırmak için beton, nemin varlığı da gerekli bir şart olduğu için kuru ısıya maruz bırakılamaz. Bu nedenle, betonun daha yüksek bir sıcaklığa maruz bırakılması ve gerekli ıslaklığın korunması, betonun buharla kürlenmeye maruz bırakılmasıyla başarılabilir. Daha hızlı bir dayanım elde edilmesi, aşağıda belirtilen birçok diğer avantaja katkıda bulunacaktır [51].

Betonun daha yüksek sıcaklığa maruz bırakılması,

- Normal (atmosferik) basınçta buharla,
- Yüksek basınçlı buharla,
- Kızıl ötesi radyasyonla (ışınla),
- Elektrik yardımıyla kürleme yollarıyla yapılabilir.

4.2.4 Nemli (İç) Kürleme Yöntemi

Tamamen önceden ıslatılmış hafif beton agregalar ve süper emici polimerler, iç kürleme için bir nem kaynağı sağlar. İç kürleme, karıştırma suyuna ek olarak bir iç su beslemesi nedeniyle, çimento suyunun hidrasyonunun ve puzolanik reaksiyonların sürdürülebildiği süreci ifade eder. İç veya nemli kürleme, yüzeyin veya açık beton yüzeylerin düzgün bir şekilde kürlenmesini sağlamak için dış kürleme yöntemleriyle birlikte yapılmalıdır. Bu iç kürleme işlemi betonun ek bir dayanım kazanmasını sağlar ve aynı zamanda kürleme süresinde belirgin bir uzamaya sebep olması nedeniyle geçirgenlikte bir azalmaya neden olur. İç kürleme

ayrıca, birçok yüksek dayanımlı betona özgü yüksek çimentolu malzeme içeriği ile betonun erken çatlamasını önlemeye yardımcı olabilir. Benzer şekilde, hızlı kuruma nedeniyle betonun erken büzülmesi de iç kürleme ile önlenabilir [52].

4.2.5 Çeşitli Hava Şartlarında Kürleme Yöntemleri

Bu kürleme yönteminde kalsiyum klorür ya bir yüzey kaplaması olarak ya da bir karışım olarak kullanılır. Bir kürleme aracı olarak yeteri şartları sağladığı düşünülebilir. Her iki yöntem de, bir tuz olan kalsiyum klorürün nemin çekim gücü gösterdiği gerçeğine dayanmaktadır. Tuz, sadece atmosferden nemi emmekle kalmaz, yüzeyde tutar. Yüzeyde tutulan bu nem, karışım suyunun buharlaşmasını önler ve böylece hidratasyonu teşvik etmek için betonu uzun süre ıslak tutar. Sıcak ve soğuk havalarda olmak üzere iki farklı şartlarda da betonun kür edilmesine dikkat gerekli önem verilmelidir [52].

4.3 Buhar Kürü Tekniği

4.3.1 Yüksek Basınç Altında Buhar Kürü (Otoklav) Tekniği

Bu kür yöntemi, hem uygulama olarak hem de elde edilen betonun yapısında meydana getirdiği değişimler açısından buharın atmosferik basınçta kürlenmesinden oldukça farklıdır.

Yüksek basınç altında buhar kürü (otoklav) tekniğinde, atmosfer basıncının üzerinde basınçlar söz konusu olduğundan kürleme işlemi sertleştirme odası, ıslak buhar beslemeli basınçlı kap içerisinde uygulanmalıdır. Uygulamada kızgın buharın beton yüzeyine temas etmesine izin verilmemelidir. Çünkü yüksek sıcaklıktaki buhar betonun kurummasına neden olur. Bu nedenle bu kür uygulama yöntemi otoklav kürü olarak bilinir ve yüksek basınçlı buhar kürü uygulamasına Otoklavlama da denir [10,26].

Yüksek basınçlı buhar kürü ilk başlarda kum-kireçli tuğla, bims ve hafif hücreli beton üretiminde kullanılırdı ve bu amaçla hala kullanılmaya devam etmektedir. Ancak günümüzde modern yapı teknolojisinde prekast beton elemanların

üretiminde ekonomik ve teknik açıdan kazandırdığı avantajlardan dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır.

Beton alanında, yüksek basınçlı buhar kürü genellikle aşağıdaki özelliklerden biri veya birkaçı istendiğinde prekast yapı elemanları üretiminde kullanılmaktadır [12].

- Yüksek erken dayanım: yüksek basınçlı buharda kürleme ile normal kürlemede 28 günlük dayanıma yaklaşık 24 saatte ulaşabilmektedir.
- Yüksek dayanıklılık: yüksek basınçlı buhar kürü, betonun sülfatlara ve diğer kimyasal saldırılara, ayrıca donma ve çözölmeye karşı direncini artırır ve çışeklenmeyi azaltır.
- Daha az kurutma büzölmesine sebep olur.

Yüksek basınç altında buhar kürü (otoklav) tekniğinde, düşük bir sıcaklıkta daha uzun bir kürlenme süresinin, yüksek sıcaklığın daha kısa bir süre için uygulanmasından daha yüksek bir dayanıma yol açtığını vurgulamakta fayda vardır.

Yüksek basınç altında buhar kürü (otoklav) uygulamada, buharlama döngüsünün detayları, kullanılan tesise ve ayrıca kür edilen beton elemanların boyutuna bağlıdır. Otoklava yerleştirilmeden önceki normal kürleme süresinin uzunluğu, buharla işlemden geçirilmiş betonun kalitesini etkilemez ve uygun bir süre seçimi karışımın tutmaya dayanacak kadar güçlü olması gereken sertliği tarafından yönetilir. Hafif betonlarda buharlama döngüsünün detayları deneysel olarak belirlenmeli, bu nedenle kullanılan malzemeler deneysel çalışmalar için uygun olmalıdır.

Yüksek basınçlı buharla kürlenmeye maruz kalan çimentonun hidratasyon ürünleri ve ikincil kireç - silis reaksiyonlarının kimyasal reaksiyonları istikrarlı olarak gelişir ve kazanılan dayanımın gerilemesi yoktur. Bir yıllıkken, normal olarak sertleşmiş betonun dayanımı, benzer karışım oranları ile hazırlanmış yüksek basınçlı buharla sertleştirilmiş betonunkile yaklaşık olarak aynıdır [8,10]. Su / çimento oranı yüksek basınçlı buharla kürlenmiş betonun dayanımını etkiler. Ancak erken dayanımın gerçek değerleri elbette normal kürlenme için olanlardan farklıdır. Isıl genişleme katsayısı ve betonun elastikiyet modülü, yüksek basınçlı buhar kürlenmesinden pek etkilenmemektedir [12].

Yüksek basınçlı buhar kürü, betonun sülfat saldırısına karşı direncini arttırır. Bu, birkaç nedenden dolayı gelişir. Birincisi ve asıl nedeni, sülfat varlığında alüminatların oluşumu, düşük sıcaklıklarda oluşarlardan daha stabil olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, sülfat saldırılarına karşı dirençteki nispi gelişme, C_3A içeriği yüksek olan çimentolarda, sülfata dirençli çimentolardan daha fazladır. Bir diğler önemli faktör ise kireç-silika reaksiyonunun bir sonucu olarak çimento hamurundaki kireç miktarının azalmasıdır. Sülfat direncindeki daha fazla gelişme, buharla işlemden geçirilmiş betonun artan mukavemeti ve düşük geçirgenliğine ve ayrıca iyi kristalleşmiş bir formda hidratların varlığına bağlıdır. Bu durum aynı zamanda yüksek basınçlı buhar kürünün, dışarı atılacak kireç kalmadığından, çiçeklenmeyi azaltmasına sebep olmaktadır [12].

Yüksek basınçlı buharla kürlenmiş beton kırılğan olma eğilimindedir. Yüksek basınçlı buharla kürlenmiş betonun ilk dayanımı normal kürle hazırlanmış betona göre daha iyidir ancak nihai dayanımında önemli bir fark görülememektedir. Genel olarak, yüksek basınçlı buhar kürü, yüksek kaliteli, yoğun ve dayanıklı beton üretir. Yüksek basınçlı buhar kürü ile kürlenmiş beton, Portland çimentosunun karakteristik renginden ayrı beyazımsı bir görünüme sahiptir [12].

4.3.2 Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Tekniğı

Betonun mikro yapısında gelişen hidratasyon reaksiyonlarındaki ivmelenme ile beton sıcaklığının paralel olarak artması, beton dayanımının kısa sürede yüksek değarlere ulaşmasını sağlar [12].

Betonda dayanım artışının fazla olması için sıcaklık artışının yanında ortamın yeterince neme doygun olması da gereklidir. Ortamın ısınması için gereken ısı ve doygun nem buhar kürü ile sağlanabilir. Betonun kürlenme sıcaklığındaki bir artış, dayanım gelişme oranını arttırdığı için betonun buharda kürlenmesiyle dayanım kazanımı hızlandırılabilir. Buhar atmosferik basınçta ve sıcaklık 100 ° C'nin altında olduğunda, işlem buharlaşmış doygun ortamdaki bir su kaynağının sağladığı özel bir nemli kürlenme durumu olarak kabul edilebilir. Yüksek basınçlı buhar kürü (Otoklavlama) tamamen farklı bir işlemdir. Yukarıdaki açıklamalardan anlaşıldığı

gibi "Atmosferik basınç altında buhar kürü" 100°C 'nin altında, atmosferik basınç altında ve doymuş buhar ortamında yapılan kürlemedir [12].

Buhar basıncıyla kürlemenin temel amacı, beton yapı elemanlarının dökümden hemen sonra taşınabilmesi için yeterince yüksek bir erken dayanım elde etmektir. Standart su ile kürlemede olduğundan daha önce kalıplar çıkarılabilir veya prekast sistemlerde ön gerilim kalıp yatağı boşaltılabilir. Bundan dolayı daha az kürleme alanı gerekir. Bütün bunlar üretim adına ekonomik ve zaman anlamında bir avantaj olarak görülmektedir. Betonun atmosferik basınçta buhar kürlemesinin, işlem sırasında betondan bünye suyunun buharlaşmasının minimum olması ve neme doymuş betonun çevre koşullarından dolayı kısa sürede yüksek dayanım sağlaması diğer kür yöntemlerine göre önemli bir avantajdır [8].

Bu işlem özellikle prekast sistemlerde beton yapı elemanlarının üretiminde önem kazanır.

Buhar kürü yöntemini etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır [12].

- 1) Malzeme özellikleri,
 - a) Beton karışımını oluşturan bileşenlerin özellikleri (Çimento tipi ve miktarı, su/çimento oranı, kullanılan katkı tipi, agreganın mineralojik ve ısı özellikleri vb.),
 - b) Betonu yerleştirme ve sıkıştırma imkânları,
- 2) Yapı elemanının boyut ve biçim özellikleri
- 3) Buhar kürü çevrim ve uygulama aşamaları
- 4) Ortam nemi, ortamın sıcaklığı, kullanılan kalıp türü uniformluğu gibi teknolojik veriler.
- 5) Kür sonrası sıcaklık ve nem koşulları

Bu faktörlerin hepsi de ayrı ayrı buhar kürünün uygulanmasındaki başarı ve ekonomik verimliliğin üzerinde etkilidir. Ayrıca sayılan bu faktörlerin en önemlileri

buhar kürü çevrimi ve uygulama aşamaları ve bağlayıcı olarak çimentonun özellikleridir [12].

4.3.3 Buhar Kürü Çevrimleri

Betonun kalıba yerleştirilmesinden bir dizi buharla kürleme işlemi uygulanarak kısa sürede dayanım kazanmasına kadar geçen süreç içerisinde uygulanan işlemler buhar kürü çevrimleri olarak adlandırılır. Aşağıdaki şekilde tipik bir buhar kürü çevrimi verilmiştir.

Pratikte uygulanan ısı işlem çevrimlerini üç başlık altında toplamak mümkündür [53].

➤ Hızlı (Sert) Buhar Kürü Çevrimleri

Uygulanan ısı işlem sıcaklığı 80–90 °C olan ve kür boyunca toplam çevrim süresi ise 6-7 saat arasında olan çevrimlerdir. Hızlı çevrimlerde sıcaklık yükseltme ve soğutma hızı ise 30°C/saat civarında ve buhar kürünün ilk aşaması olan ön dinlendirme süresi 1 saat veya daha az olan çevrimlerdir.

➤ Orta (ılımlı) Buhar Kürü Çevrimleri

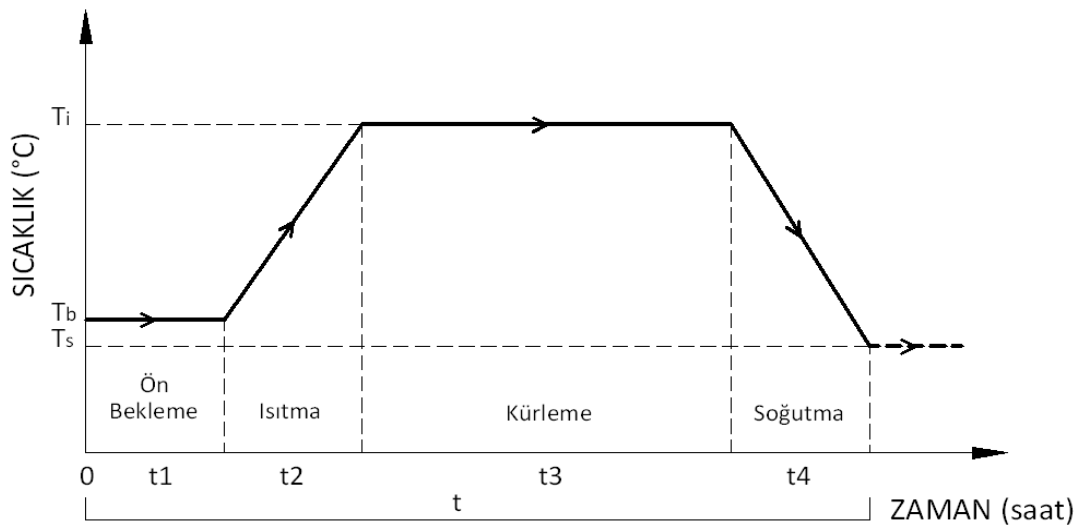
Uygulanan ısı işlem sıcaklığı 70 °C civarında olan ve kür boyunca toplam çevrim süresi 9–11 saat arasında olan ısı işlem çevrimleridir. Bu çevrimde ön dinlendirme süresi 2–3 saat olup sıcaklık yükseltme ve soğutma hızları 15–20 °C/saat civarındadır. Kürden çıkan beton elemanın sıcaklığı 30–40 °C iken kalıptan çıkarılabilir.

➤ Yavaş (Yumuşak) Buhar Kürü Çevrimleri

Uygulanan ısı işlem sıcaklığı 55–60 °C'yi aşmayan ve toplam kür süresi 20–22 saat olan çevrimlerdir. Ön dinlendirme süresi 4 saat olup sıcaklık yükseltme ve soğutma hızları ise 10 °C/saat civarındadır.

4.3.4 Buhar Kürünün Aşamaları

Taze betonun kısa sürede yüksek dayanıma ulaşmasını yeterli sıcaklık ve doygun nem şartlarını sağlayarak elde edilmesi esasına dayanan bu kür yöntemi, betonun farklı basınç ve sıcaklıklara maruz bırakıldığı 4 farklı periyottan oluşmaktadır. Tipik bir ısıtım işlem çevrimini oluşturan bu periyotlar, Resim 4.1’de grafiksel olarak gösterilerek her biri alt başlıklar halinde açıklanmıştır.



Resim 4.1 Tipik Bir Isıtım İşlem Çevriminin Aşamaları [53]

Ön bekleme ya da ön dinlendirme periyodu (t_1), betonun kalıba yerleştirilmesinden buhar kürü uygulamasına kadar geçen süre ile tanımlanan zaman dilimini ifade etmektedir. Ön bekleme periyodunda amaç, çimento ile su arasında gelişen hidratasyon reaksiyonlarının bir kısmının başlamasına izin vererek çimento hamuru fazının jelleşme sürecine girme kararlılığını kazandırmaktır. Aynı zamanda bu sürecin bir amacı da, betonun ileride maruz kalacağı termal genleşmelere karşı kararlı bir içyapı meydana getirmesini sağlamaktır. Özellikle ön bekletme süresinin çok kısa olduğu hızlı çevrimlerde, betonun kohezyonu su ve hava fazlarının genleşmelerini önlemeye yetersizdir. İşlem döneminde hızlı hidratasyona giren beton sertleşir ve soğuma periyoduna sertleşmiş beton olarak girer. Böylece başlangıçtaki kararsız yapı sertleşme sonrasına da taşınmış olunur. Çevrim başında taze, çevrim sonunda sertleşmiş olan beton meydana gelen kalıcı hacim artışı sonucu gözenekli ve

ileri yaşlarda düşük kaliteli bir malzeme olarak ortaya çıkar. Bu nedenle ön bekletme süresi ne kadar uzunsa, priz ve sertleşme o kadar ilerler, hacim artışı da o oranda az olur. Ayrıca ön bekletme periyodunda sıcaklığın yüksekliği nispetinde hidrasyon reaksiyonları hızlanır ve beton dayanım kazanır [53].

Buhar kürü öncesi bütün yapı elemanları özellikle de blok ve taşıyıcı ön yapımlı elemanları çevre sıcaklığına bağlı olarak 1 ile 7 saat arasındaki ön bekleme süreleri uygulanmalıdır. Kütleleri fazla, dolu elemanlarda en az 3 saat buhar kürü öncesi bekleme uygulanması uygun görülmüştür. Hidrasyon ısısı yüksek olan çimentolar kullanıldığında su/çimento oranı yüksek olan elemanların üretildiği ortamın soğuk olduğu durumlarda (0°C - 10°C), buhar kürü öncesi bekleme süreleri 5 ila 7 saat arasında tutulması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca bu işlemin rüzgâr ve güneşin etkilerinden uzak $5\text{-}30^{\circ}\text{C}$ arasında yapılması öngörülmüştür [54] .

Kontrollü ısıtma periyodu (t_2), ön bekleme süresinin sona erdikten sonra buharla birlikte sıcaklığın maksimum kür sıcaklığına erişmesi için geçen zaman dilimidir. Bu süreçte kür sıcaklığının artış hızı sabit olmalıdır. Isı artış hızının yüksek olması betonun aşırı genleşmelere maruz kalmasına ve nihai dayanımının olumsuz yönde etkilenmesine sebep olur.

Buhar kürü öncesi ön bekleme periyodunun süre ve koşullarına bağlı olarak saatte 35°C ye varan sıcaklık yükselmeleri uygulanabilir. Ancak saatte 30°C ve daha yüksek sıcaklık artış hızları uygulandığında, ısı şoku ihtimali artacağından ve nihai yaşlardaki dayanımlar düşük olabilmektedir. Bu süreçte sıcaklık artış hızının üretim maliyeti ve teknik açıdan saatte $20\text{-}30^{\circ}\text{C}$ dolaylarında olması uygun görülmektedir [53].

Kürleme veya ısı emdirme periyodu (t_3) , buhar kürene maruz betonun belirli bir süre maksimum değerinde sabitlenen sıcaklıkta tutulduğu aşamadır. Bu periyotta uygulanacak maksimum sıcaklık ve sürecin uzunluğu hidrasyon hızı ile doğrudan ilişkilidir. Betonun erken dönemde yeterli bir dayanıma ulaşması ve uzun dönemde dayanım kaybının sınırlı düzeyde kalması bakımından, maksimum sıcaklığın üst sınırlarında sürecin kısa, alt sınırlarında ise daha uzun tutulması uygundur TS 3648

(1984)'de ön yapımlı beton elemanlar için ekonomik ve teknik açıdan 65-85 °C'ler arasındaki sıcaklıklar uygun görülmektedir. Bu durumda betonun hızlandırılmış küründe 85°C ve üzeri kür sıcaklıklarının nihai dayanıma olumsuz etkilerinden dolayı uygun olmadığı söylenebilir. Betonun aynı dayanımı kazanması, düşük sıcaklıkta uzun süreli bir çevrimle elde edilebileceği gibi, yüksek sıcaklıkta kısa bir çevrimle de elde edilebilir.

Isı emdirme periyodunun ne kadar süre olması hususunda toplam kür çevriminin 18 saati geçmemesi kuralı esas alındığında, optimum bir ısı emdirme süreci 3 ila 5 saat arasında olduğu kabul edilebilir. Bu süre çimento dozajı, su/çimento oranı, kütle/yüzey alanı oranı gibi parametrelere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir [12].

Kürleme veya ısı emdirme periyodu bittikten sonra betonun sıcaklığı kontrollü bir şekilde düşürülmelidir. Dolayısıyla kür sonunda betonun çevre sıcaklığına erişinceye kadar soğutulması işlemi belirli bir süre alacağına geçirilen süre kontrollü soğutma periyodu olarak tanımlanır. Bu süreci belirleyen en önemli husus soğutma hızıdır. Bu işlemde amaç sıcak buhar kürüne maruz bırakılan beton elemanların ani ve homojen olmayan sıcaklık değişiminden ortaya çıkan farklı büzülmelerin yaratacağı çekme gerilmelerinden zarar görmemesi için beton eleman sıcaklığının kontrollü bir şekilde azaltılmasıdır [55].

Kütlesi yüzeyine oranla daha büyük olan ve doluluğu fazla olan yapı elemanlarının soğutulma işleminde, ince kesitli elemanlara göre daha yavaş bir soğutma hızı uygulanmalıdır. Bu alanda yapılan araştırmalar dikkate alındığında soğutma hızının 0,25-0,50°C/dakika olması önerilmektedir [53].

5. HİDRATASYON ve MİKROYAPI**5.1 Çimentonun Hidratasyonu**

Çimentonun anhidrit halde ihtiva ettiği temel oksitlerin (silikat ve alüminatların) suyla bir araya gelmesiyle oluşan çimento pastası, harç ve beton için matris fazı görevi gören taş benzeri bir malzemeye dönüşür. Bu işlem temelde çimentolu malzemenin mikroyapısının gelişimini karakterize eden “çimento hidratasyonu” olarak isimlendirilir. Bu dönüşüm süresi boyunca, bir takım karmaşık kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar meydana gelir. Kimyasal reaksiyonlar, hidratasyon ürünlerinin faz değişikliklerini gösterirken, fiziksel reaksiyonlar, hidratasyon ürünlerinin içyapıdaki yeniden dağılımını gösterir. Nihai olarak çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler, çimento esaslı malzemelerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin taşınmasını doğrudan belirleyen, gözeneksiz sert bir malzeme oluşmasına sebep olmaktadır [60].

Portland çimentosunun hidratasyonu ile çimentodaki karma oksitler aldıkları yüksek ısı nedeniyle içlerinde var olan enerjiyi su ile bir araya gelince açığa çıkarırlar. Bu enerji ekzotermik reaksiyonlar ile başlar ve çimentonun hidratlaşmasıyla sonuçlanır. Çimentonun karma oksitleri su ile ayrı ayrı reaksiyona girerek her ana bileşenden farklı hidratasyon ürünleri açığa çıkarırlar. Çimentonun ana iskeletini C_3S ve C_2S (kalsiyum silikatlar) oluşturur. Bu oksitlerin su ile reaksiyonu sonunda çimentonun dayanımını sağlayan esas bileşenler olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ile sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) yani portlandit oluşur. Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) çimentoya bağlayıcılık özelliği kazandırır. Sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) ise su içinde eriyerek gözenekli bir yapı oluşmasına sebep olduğundan beton dayanımını ve dayanıklılığını azalttığı için $Ca(OH)_2$ 'in varlığı pek istenmez [61].

C_3S 'in hidratasyonu sırasında açığa çıkardığı ısı orta değerdedir. C_3S 'in bağlayıcılık özelliği ilk yaşlardan itibaren kendini göstermektedir. C_2S 'in su ile reaksiyonu C_3S 'e kıyasla daha yavaştır ve reaksiyon sırasında az miktarda ısı açığa

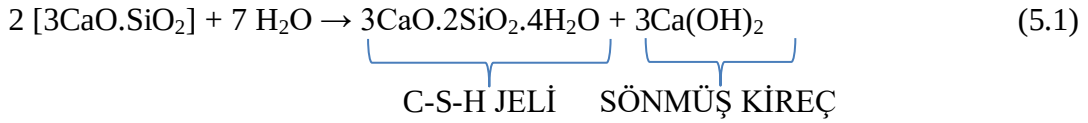
çıkarmaktadır. C_2S 'in sahip olduğu yüksek bağlayıcılık özelliği betonun nihai yaşlarında kendini gösterebilmektedir[62]. Portland çimentosunda bulunan mineraller arasında prize ilk başlayan bileşen olan C_3A 'ın suyla çok hızlı reaksiyona girerek erken hidratasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. C_3A 'nın hidratasyon üzerindeki davranışı, kalsiyum sülfatın varlığından (genellikle alçıtaşı) kuvvetle etkilenir. Çimentonun erken priz almasını yavaşlatmak için alçı kontrollü olarak çimento ayarına (klinkere karıştırılarak) eklenir. C_3A 'nın bağlayıcılık değeri çok az olmasıyla birlikte olumsuz kimyasal ataklara (sülfatların yıpratıcı etkilerine) karşı çimentonun direncini düşürmektedir. C_4AF 'nin bağlayıcılık değeri diğer temel oksitlerin yanında çok azdır ve su ile pek fazla bir reaksiyonu görülmemektedir [71,72].

Çizelge 5.1 Çimento Ana Bileşenlerinin Relatif Özellikleri [3]

	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok yüksek	Orta
İlk günlerdeki dayanım	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Son günlerdeki dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

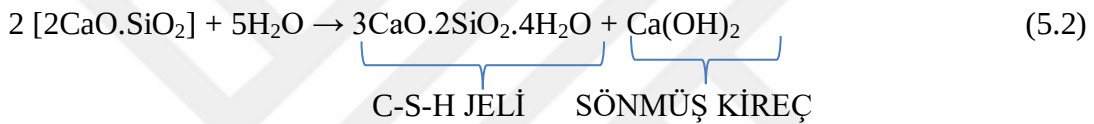
Çimento hacminin % 55'ini erken dayanıma katkısı olan Trikalsiyum silikat (C_3S), % 20'sini ise nihai dayanıma katkısı olan Dikalsiyumsilikat (C_2S) oluşturmaktadır. C_3S 'nin hidratasyonu genellikle çimento hidratasyonu için bir model olarak referans alınmaktadır. Bu durum, çimento hidratasyonun erken aşamalarında üretilen C-S-H'nin esas olarak C_3S hidratasyonundan kaynaklandığı gerçeğine dayanmaktadır [61].

Suyun varlığında C_3S ve suyun reaksiyonu aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.



Denklemden görüleceği gibi C_3S ile suyun reaksiyonu sonucunda C-S-H ($3\text{CaO}.2\text{SiO}_2.4\text{H}_2\text{O}$) kompozisyonu ve ($3\text{Ca}(\text{OH})_2$) sönmüş kireç elde edilmektedir. Tamamen hidratize olmuş C_3S hamuru %60-70 oranında C-S-H fazı içerir. C-S-H fazı kolloidal boyutta tanecikler içerir [65].

C_2S hidratasyonunda C-S-H'nin stokiometrisinin tayininde belirsizlikler görülmektedir. C_2S 'in su ile reaksiyonu aşağıdaki denklem yardımıyla açıklanabilmektedir.



C_2S 'in su ile girdiği reaksiyon sonucunda oluşan sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), C_3S 'in ekzotermik reaksiyonunda açığa çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'den daha az olduğu görülmektedir. C_2S bileşeni C_3S bileşeninden çok daha yavaş hidratize olmaktadır. Bundan dolayı C_3S bileşeninin reaksiyonun ilk zamanlarında çimentonun dayanım artışına katkısı daha çoktur [3].

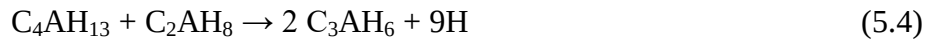
Genel olarak betonun dayanıma pek katkı sağlayamayan C_3A bileşeni Portland çimentosunun yaklaşık %4-11'ini kaplamaktadır. Tipik bir Portland çimentosunda bulunan temel bileşenler arasında C_3A 'ın suyla en reaktif olduğu ve erken hidratasyon üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. C_3A 'nın hidratasyon üzerindeki davranışı, kalsiyum sülfatın varlığından (genellikle alçıtaşı) kuvvetle etkilenir. Çimentonun üretim prosesinde uygun olan, C_3A 'nın hidratasyonun gerçekleştiği zaman diliminde alçı taşının kontrollü olarak çimento ayarına eklenmesidir.

Alçı varlığında gerçekleşen C_3A 'nın hidratlaşma ısı oluşum profilinde, ilk ısı yükselişi etrenjit oluşumundan kaynaklanır. Hidratlaşma ısısındaki İkinci pikin sebebi ise mevcut kalsiyum sülfatın kalitesine bağlı olarak etrenjitin

monosülfoalüminathidrata dönüşümünün başlamasındandır. Sistemde ne kadar alçı taşı varsa, o kadar fazla etrenjit oluşacak ve daha uzun süre hidratasyon ısısı dengede kalacaktır [61].

C₃A'nın su ile reaktif olması kalsiyum alüminat hidratların, kalsiyum karboalüminat ve sülfalüminatların oluşumu ile çimento hamurunda ani prizın gelişmesine yol açmaktadır. C₃A'nın çimento yapısında yüksek oranda bulunması, gelecekte betonun servis ömrü boyunca kimyasal ve fiziksel sorunlara karşı direncinin düşmesine sebep olmaktadır. Örneğin sülfat etkisine maruz kalan bir betonun bağlayıcı temel malzemesi çimentoda C₃A oranının %5'den daha fazla bulunmaması gerektiği önerilmektedir.

C₃A'nın su ile reaksiyonu, hegzogonal fazdaki C₄AH₁₃ ve C₂AH₈ bileşenlerin termodinamik kararsızlıklarından dolayı kübik fazlı C₃AH₆ yapısına dönüşmesini sağlamaktadır.



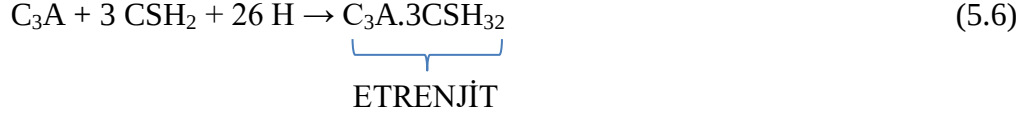
Doygun haldeki sönmüş kireç (Ca(OH)₂)çözeltilerinde, sönmüş kirecin C₂AH₈ bileşeni ile reaksiyona girmesiyle C₄AH₁₃ veya C₃AH₆ bileşenleri oluşmaktadır. C₃A'nın 80°C ve üzeri sıcaklıklarda gerçekleşen hidratasyonu ile kübik formulu C₃AH₆ oluşmaktadır.



Normal hidratasyon koşullarında C₃A'nın hidratasyonu sonucunda oluşan kübik formdan dolayı diğer silikat fazlarına göre daha düşük dayanım göstermektedir. 80°C ve üzeri sıcaklıklarda Düşük su/katı oranında gerçekleşen C₃A'nın hidratasyonu sırasında C₃AH₆'ın oluşumu tanecikler arasında doğrudan bağlanmayı sağlamasından dolayı dayanım büyük ölçüde artmaktadır.

Portland çimentosunun üretim aşamasında C₃A fazı hidratasyonunda oluşan ani prizi kontrol altında tutabilmek için ortama belirli oranlarda alçıtaşı

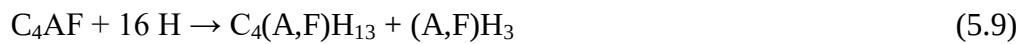
(CaSO₄.2H₂O) takviyesi yapılmaktadır. C₃A'nın alçı taşı ve su ile kısa bir sürede gerçekleşen reaksiyonu ile etrenjit (C₃A.3CSH₃₂) oluşumu gözlenmektedir (Eşitlik 5.5).



Etrenjit, genellikle alçı partiküllerinden ziyade C₃A yüzeyinde deneysel olarak tespit edilir. Yapıda mevcut alçıtaşının etrenjite (C₃A.3CSH₃₂) dönüşmesinden sonra reaksiyona giren C₃A yüzeyi üzerinde göreceli olarak geçirgen bir kaplama oluşturduğu görülür. Hidratasyon sisteminin sıvı fazı Ca⁺² ve SO₄⁺² iyonlarında yetersiz olduğunda reaksiyona girmeden kalan C₃A ile etrenjitin (C₃A.3CSH₃₂) reaksiyonu sonucu etrenjit molekülleri monosülfoalüminat hidratlara (C₃A.CSH₁₂) dönüşmektedir (Eşitlik 5.6). Bu ekzotermik reaksiyon 12-36 saat arası sürmekte ve sistemde mevcut alçı taşı ne kadar fazlaysa dönüşüm süresi o kadar uzamaktadır. Bu dönüşüm sırasında çimentoya mineral veya kimyasal katkıların ilave edilmesiyle reaksiyonun hızı ayarlanabilmektedir [66].

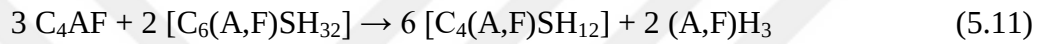


Ferrit (C₄AF) fazı Portland çimentosunda %8-13 arasında yer kaplamaktadır. C₄AF ve C₂S bileşenleri, hidratasyon ısısı oluşumundaki yavaş-orta hidratasyon oranlarından dolayı izlenmesi zordur. Ferrit fazı hidratasyon ısısına katkısı ihmal edilebilir düzeydedir. Bu oksit, ilk ve nihai mekanik dayanıma katkısı açısından diğer çimento bileşenlerine kıyasla daha az rol oynamaktadır. Ferrit fazı, C₃A fazı ile uygun miktarlarda alçı taşı ile beraber kullanıldığında çimentoya az miktarda bağlayıcılık özelliği kazandırır. Ancak, çimentoya hidrolik bağlayıcılık özelliğini ve çimentonun zamanla dayanım kazanmasını C₃S ve C₂S bileşenleri sağlamaktadır.



C₄AF'nin su ile girdiği reaksiyon yavaş gelişmektedir. (Eşitlik 5.7ve Eşitlik 5.8). Ferritin (C₄AF) su ile reaksiyonları sonucu amorf yapıda demir ve alüminyum hidroksitler meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık ve düşük su/katı oranlarında C₄AF hidratasyonu, kübik fazın oluşumunu doğrudan arttırmaktadır.

Ferrit (C₄AF), C₃A'a göre alçıtaşı ile daha yavaş reaksiyona girer ve hidratasyon ısınıı düşürerek gecikmesini sağlar. Aşağıdaki denklemlerde Alçıtaşının C₄AF ile reaksiyonları görülmektedir [65].



5.1.1 Hidratasyon Süreçleri

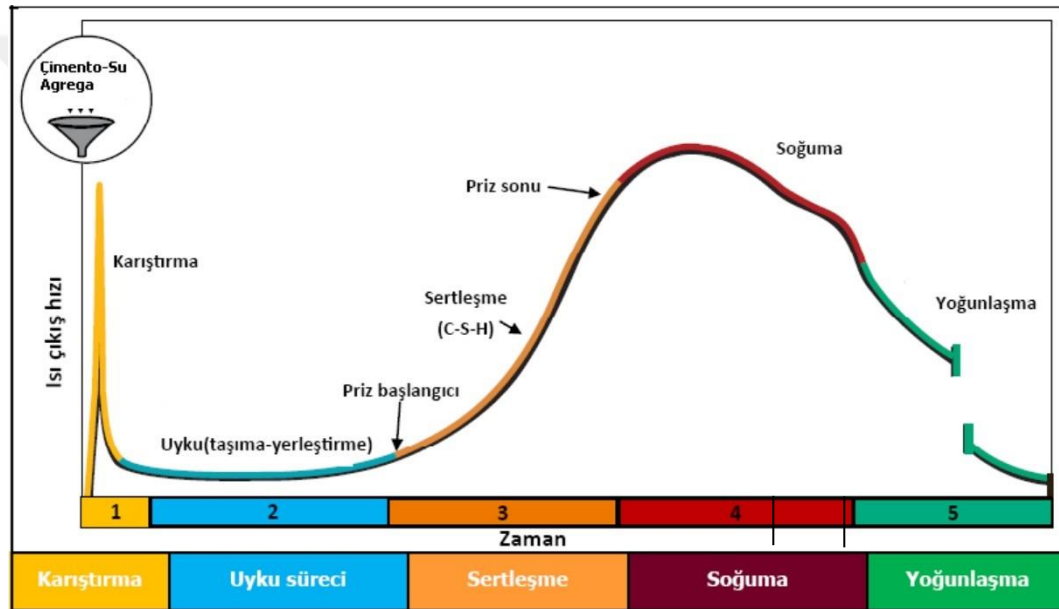
Çimento hamurunun hidratasyonu, çimento ve sudan oluşan sıvı bir karışımdan sert bir katıya dönüşümünü sağlayan bir dizi örtüşen kimyasal reaksiyondur [67]. Hidratasyon reaksiyonları, reaksiyona girecek olan maddelerin olmaması (çimento bileşenleri, su) veya hidratasyon ürünlerini biriktirecek boşluğun olmaması reaksiyonların durmasına neden olur. Çimentonun hidratasyonu, silikat veya alüminat fazlarının bireysel olarak hidratasyonundan çok daha karmaşıktır. Çünkü çimentoyu oluşturan temel oksit fazların reaksiyonları aynı anda farklı oranlarda ilerler ve bu nedenle birbirlerini kompleks bir şekilde etkileyebilirler. Bununla birlikte, genel olarak gelişen prensipler aynıdır [60].

Hidratasyon olayının ilerlemesi ve kinetiği çeşitli faktörlerden etkilenir, bunlar;

- Çimentonun temel oksitlerinin oluşmasıyla,
- Çimento taneciklerinin büyüklük dağılımı ve yüzey genişliği ile
- Karışımın su / çimento oranı ile
- Betonun kür sıcaklığı ile
- Katkı maddelerinin varlığı örneğin granüle yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi daha çok miktarlarda çimentonun arasına giren malzemelerin

mevcudiyeti hidratasyon olayını ve bu sürecin devam etmesini etkilemektedir.

Tipik bir Portland çimentosu çok bileşenli heterojen bir sistem olduğundan, hidratasyonu hem paralel hem de art arda gerçekleşen bir dizi kimyasal reaksiyondan oluşan zamana bağlı karmaşık bir işlemdir. Gelişen bu ekzotermik reaksiyonların genel gelişimi izotermal iletim kalorimetrisi kullanılarak gözlemlenebilmektedir. Sıradan bir Portland çimentosu için tipik bir ısı değişim eğrisinden, çeşitli hidratasyon aşamaları tanımlanabilmektedir [68].



Resim 5.1 Hidratasyon Süreçleri [56]

Karıştırma evresinde çimentonun hidratasyonu sırasında silikatlar ve su arasındaki reaksiyonlar, betonu güçlü ve dayanıklı kılan temel bileşikleri üretir. Bununla birlikte, ilk dakikalarda silikatlar çok yavaş çözünür ve reaksiyona hemen etkisi olmaz. Bu nedenle bu evrede baskın olan bileşenler alüminatlardır [56].

Alüminat reaksiyonları, uyku hali olarak tanımlanan evrede yaklaşık iki ila dört saat boyunca yavaşlar. Bu evrede betonun plastik kıvamda olduğu ve reaksiyonların yavaşlama eğiliminin jelimsi tabakadan kaynaklandığı bilinmektedir [56].

Sertleştirme evresinde karışım suyu, çözünmüş kalsiyum iyonlarıyla aşırı doymun hale geldiğinde, yeni hidrate bileşikler oluşmaya başlar. Tepkimeyle birlikte ısı açığa çıkar ve karışım sertleşmeye başlar. Betonun sertleşmeye başladığı priz başlangıcı olarak ifade edilen bu evrede, hidratasyon ürünlerinin miktarı devamlı olarak artış halindedir. Buna paralel olarak ekzotermik reaksiyonlarda açığa çıkan ısı miktarı da artar [56].

Soğuma evresinde reaksiyonlar sonunda çimento hamuru bileşenler açısından doymun hale gelmiştir. Ortamda reaksiyona girmemiş malzemenin miktarı ve hidratasyon tepkimelerinin oranı azaldığından hidratasyon hızı yavaşlar [68].

Yoğunlaştırma evresinde hidratasyon ürünlerinin sürekli büyüme ve iç içe geçmesi ile reaksiyon hızı ve ısı çıkışı önemli düzeyde azalır. Hidratasyon ürünleri halen artmaya ve gelişmeye devam etmektedir. Beton içerisinde tepkimeye girmemiş çimento tanecikleri ile su, mevcut olduğu sürece betonun gücünü artıracak ve geçirimsizliğini azaltacak reaksiyonlar çok uzun bir süre devam eder. Özetle, betonun dayanımı ve dayanıklılığı yıllar sürebilecek bir zaman diliminde artmaya devam etmektedir[61,62].

5.2 Taramalı Elektron Mikroskopuyla Mikro Yapının İncelenmesi

Sertleşmiş çimento karışımlarının mikro yapısının ileri teknoloji yardımıyla araştırılması, beton endüstrisinin dayanıklı yapı malzemeleri için uygun bağlayıcılar geliştirmesine yardımcı olmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu, beton, çimento ve agrega mikro yapısının karakterizasyonunda ve betonun dayanım ve dayanıklılık düşüşlerinin sebeplerinin yorumlanmasında belirgin avantajlara sahiptir. Resim 5.1’de bu çalışmada kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görülmektedir.



Resim 5.2 Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

5.2.1 Taramalı Elektron Mikroskobunun Çalışma Prensibi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek çözünürlükte görüntü elde edebilmesi, odak derinliği ve görüntü ile analizi birleştirme özelliğinden dolayı yaygın bir kullanım alanı vardır [60].

Taramalı elektron mikroskobu;

- Elektron kaynağı
- Elektronların elektromanyetik merceklerle hareket ettiği sütun
- Elektron detektörü
- Numune odası
- Görüntüleme sisteminden oluşmaktadır.

Taramalı Elektron Mikroskobunda görüntünün oluşması; akımı, çapı ve sapma miktarı bilinen elektronların belirli bir noktaya çarptırılma sonucunda malzeme ve elektron demeti arasında oluşan ışımlar ve geri yansıyan sinyallerden oluşmaktadır. Elde edilen bu sinyaller algılayıcılar vasıtasıyla toplanarak elektron demetinin çarptığı tek bir noktanın topografik bir görüntü belirlenmektedir. Algılayıcılarda toplanan sinyaller güçlendiricilerden geçirildikten sonra dijital sinyallere çevrilerek

bilgisayar monitörüne aktarılmasıyla elde edilir. Bu görüntü eldesinde genellikle numune kesiti üzerinden soğurulmuş elektronlardan yararlanılır. Numune yüzeyinin topografisi, numune kesiti üzerinden yansıyan ikincil (soğurulmuş) elektronlarının sayısındaki değişimi doğrudan etkiler.

5.2.2 Elektron Demeti-Numune Etkileşimi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), numuneyi yüksek enerjili elektron demeti ile tarayarak görüntüler üretir. Elektronlar örnekle etkileşime girdiklerinde ikincil elektronlar, geri saçılmış elektronlar ve karakteristik X-ışınları üretirler. Bu sinyaller, daha sonra bilgisayar ekranında görüntülenen görüntüleri oluşturmak için bir veya daha fazla detektör tarafından toplanır. Elektron ışını numunenin yüzeyine çarptığında, hızlanma voltajına ve numunenin yoğunluğuna bağlı olarak numuneye birkaç mikron derinliğe nüfuz eder. İkincil elektronlar ve X ışınları gibi birçok sinyal, numune içindeki bu etkileşimin bir sonucu olarak üretilir.

Bir taramalı elektron mikroskobundan elde edilen maksimum çözünürlük, elektron spot büyüklüğü ve elektron ışınının numune ile etkileşim hacmi gibi birçok faktöre bağlıdır. Atomik çözünürlük sağlayamasa da, bazı SEM'ler 1 nm'nin altındaki çözünürlüğü elde edebilir. Tipik olarak, modern tam boyutlu SEM'ler 1-20 nm arasında çözünürlük sağlarken, masaüstü sistemleri 20 nm veya daha fazla çözünürlük sağlayabilir [60].

5.3 Hidratasyon Sırasında Mikroyapının Gelişmesi

Çimento pastasında mikro yapının gelişimi, hidratasyon ürünleri (katı ve jel fazların) oluşumunu ve gözenek yapı ağı (gözenek fazı) dağılımını içerir. Hidratasyon sırasında, hidratasyon ürünlerinin oluşumuyla birlikte gözenekler azalır. Yapısal oluşum ve hidratasyon olayı arasında birbirini etkileyen bir ilişki vardır. Makro ölçekte bu yapısal oluşum süreci, dayanım, dayanıklılık ve geçirimsizlik gibi bazı malzeme özelliklerinin gelişimini doğrudan etkiler [56].

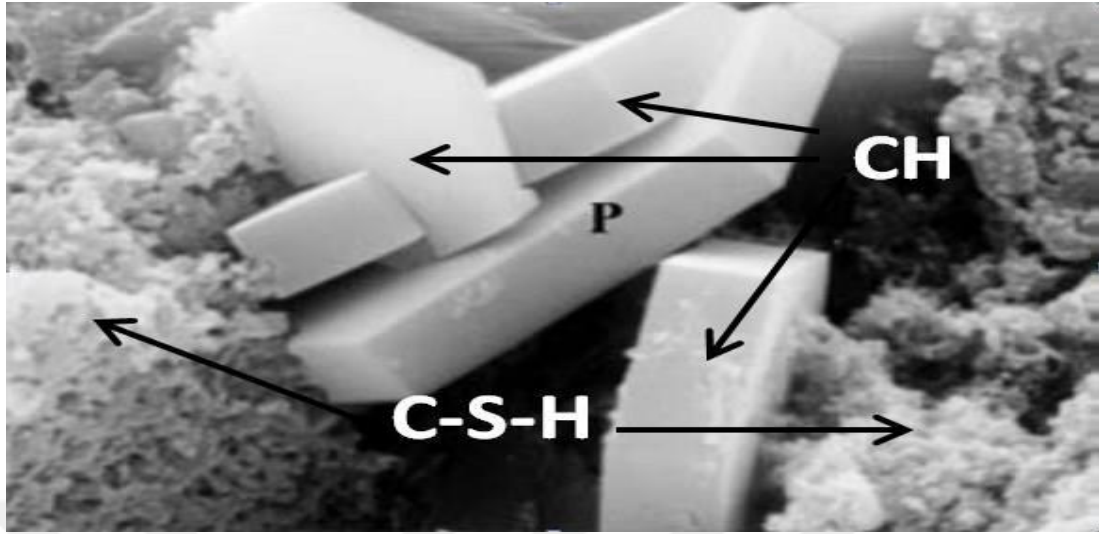
Hidratasyon işlemi sırasında üç ana hidratasyon ürünü oluşur. Bunlar,

- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H)
- Kalsiyum hidroksit (CH)
- Kalsiyum sülfaluminat hidratları (Etrenjit ($C_6AS_3H_{32}$) ve Monosülfat (C_4ASH_{18}))

Susuz çimento parçacıkları içeren bu hidratasyon ürünleri, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen mikro yapısındaki katı ve jel fazlarıdır.

5.3.1 Hidratasyon Ürünleri

C-S-H olarak kısaltılmış olan kalsiyum silikat hidrat fazı, çimentoya kazandırdığı bağlayıcılık özelliği ile betonun dayanım kazanmasını sağlayan hidratasyon ürünüdür. C-S-H'nin moleküler büyüklüğü çimento tanesinden yaklaşık 1000 kat daha küçük bir yapıya sahiptir. Hidratlanmış bir Portland çimentosu pastasında katı fazların hacminin yaklaşık % 50-60'ını oluşturur. Bu nedenle çimento pastasının özelliklerini belirleyen en önemli fazdır. C-S-H'nin morfolojisi, zayıf kristalimsi liflerden retiküler ağa değişmektedir. C-S-H kristal yapısının kolloidal boyutları ve kümelenme eğilimleri, elektron mikroskobu ile görülebilir. C-S-H 'ın (amorfa yakın) kristal yapısının doğada doğal olarak bulunan tobermorit mineralinin kimyasal yapısına benzemesinden dolayı C-S-H yapısına bazen tobermorit jeli de denmektedir. C-S-H jelinin tam yapısı bilinmemekle birlikte, malzemeler çok geniş yüzey alanına sahip rastgele düzenlenmiş düzensiz veya kıvrımlı katmanlı bir tabaka yapısına sahiptir. Bu jeller, üzerinde küçük dikenleri olan bir kese görünümündedir. Ölçüm tekniğine bağlı olarak, 100-700 m²/ g arasındaki yüzey alanına sahip C-S-H jelinin esas gücünün moleküler yapısındaki Van der Waals bağ kuvvetinden kaynaklandığı düşünülmektedir [57].



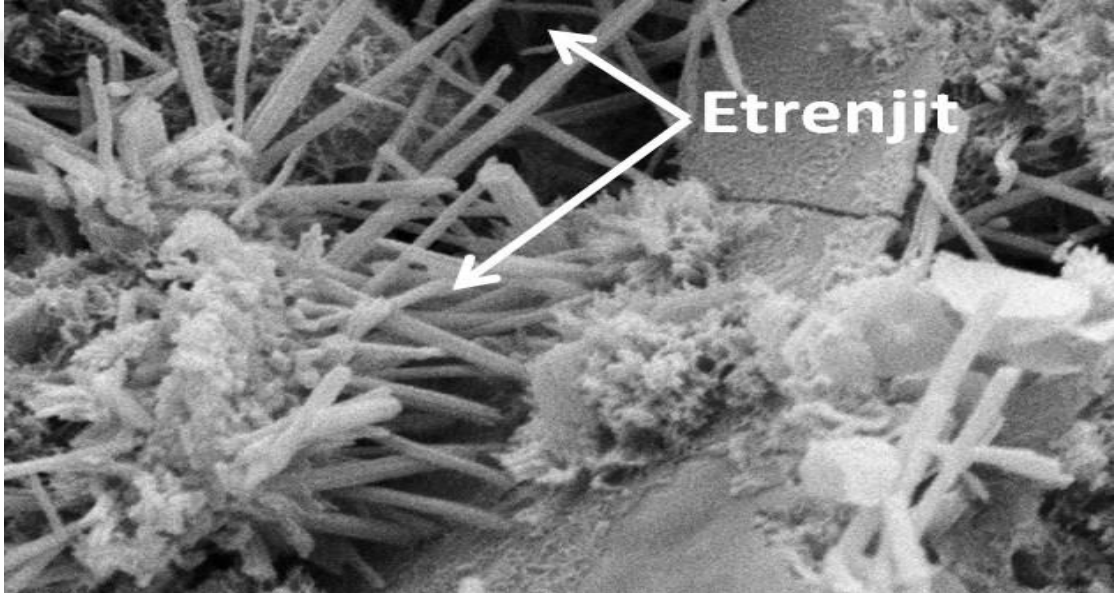
Resim 5.3 Çimento Hamuru İçindeki CH Kristalleri Ve C-S-H Jelleri (1000 Kat Büyütülmüş)

Dayanıma fazla etkisi olmayan Kalsiyum Hidroksit (CH), betonun mikro ortamının bazik olmasını sağlar. Zayıf yapısından dolayı tepkimelerde gerekenden fazlası istenmeyen bir üründür. Katkılı çimentolarla yapılan betonlarda CH oranı çok daha düşüktür. CH düzgün altıgen şeklinde tabakalı bir yapıdadır. C-S-H'e oranla oldukça büyük boyutta olan CH genelde boşluklarda ve çimento hamuru-agrega ara yüzeylerinde birikir.

Kalsiyum hidroksit kristalleri (ayrıca portlandit olarak da bilinir), hidratlanmış çimento pastası içindeki katı hacminin % 20 ila 25'ini oluşturur. C-S-H'den farklı olarak, kalsiyum hidroksit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin tam stokiyometrisine (orantı) sahip bir bileşiktir. Bu bileşen C-S-H jelinden farklı olarak altıgen bir prizma morfolojisine sahip büyük kristaller oluşturma eğilimindedir. C-S-H'a oranla daha büyük bir yapıya sahip olan CH, genelde betonun mikro boşluklarında ve aderansı etkileyebilecek çimento hamuru-agrega ara yüzeylerinde birikir. Morfolojik yapısı hidratasyon sıcaklığı ve yapı içerisinde bulunan yabancı maddelerden etkilenir. C-S-H jeli ile karşılaştırıldığında, kalsiyum hidroksitin dayanıma katkısı göreceli olarak düşük yüzey alanı nedeniyle sınırlıdır [57].

Kalsiyum sülföalüminat hidratları (Etrenjit ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$) ve Monosülfat ($\text{C}_4\text{ASH}_{18}$)), hidratlanmış çimento pastası içindeki katı hacminin % 15 ila 20'sini

kaplar. Bu nedenle mikroyapısal özelliklerin gelişiminde çok küçük bir rol oynar. Hidratasyonun erken aşamalarında, çözelti fazının sülfat / alüminat iyonik oranının genel olarak iğne şeklindeki prizmatik kristalleri oluşturan etrenjit olarak da adlandırılan $C_6AS_3H_{32}$ oluşumunu desteklediği belirtilmiştir. Tipik bir Portland çimentosu hidratasyonunda etrenjit oluşumu sonunda altıgen plaka kristalleri oluşturan monosülfat hidrat, C_4ASH_{18} 'e dönüşür. Portland çimentosu betonunda monosülfat hidratın varlığı, betonun sülfat saldırısına karşı dirençsiz olmasına sebep olur [56].



Resim 5.4 Çimento Hamurunda Oluşan Etrenjitlerin Görünümü

5.3.2 Betonun Gözenekli yapısı

Beton dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan çeşitli boşluk türlerini içerir. Gözenek yapısının oluşumu büyük ölçüde hidratasyon işlemine ve su/çimento oranına bağlıdır.

Çizelge 5.2 Hidrate Çimento Hamuru İçindeki Boşlukların Sınıflandırılması [58]

BOŞLUK TİPİ	BOYUTLARI	TANIMI	BOŞLUK İÇERİSİNDEKİ SUYUN ETKİSİ	HAMURUN ETKİLENDİĞİ ÖZELLİKLERİ
Sürüklenmiş Hava	0.1-1.0 mm	Yuvarlak Kesitli	Boş	Dayanım
Kılcal Boşluklar	10-0.05µm	Büyük Kılcal Boşluklar	Serbest Su	Dayanım, Dayanıklılık Ve Geçirimsizlik
	10-50 µm	Orta Büyüklükteki Kılcal Boşluklar	Orta Kuvvette Yüzey Gerilim Kuvveti Yaratır	Dayanım, Dayanıklılık, Geçirimsizlik Ve Yüksek Rutubette Rötme
Jel Boşlukları	10-2.5nm	Küçük Kılcal Jel Boşluklar	Güçlü Yüzey Gerilim Kuvveti Yaratır	%50 Bağlı Nemde Rötme
	2.5-0.5nm	Mikro Boşluklar	Güçlü Adsorblanmış Sudur	Rötme Ve Sünme
	<0.5nm	Kristaller Arası Boşluklar	Bağlar İçerisindeki Sudur	Rötme Ve Sünme

Betonun yapısında farklı boyutlarda jel boşlukları, kılcal gözenekler ve hava gözenekleri olmak üzere üç tür boşluk yapısından bahsetmek gerekir [58].

C-S-H jeli çimento hamurunun ana bileşenidir ve çimento hamurunun sağlamlığından ve mikro yapısından sorumludur. C-S-H jeli, jel gözenekleri adı verilen yaklaşık birkaç nanometrelilik gözenekleri içeren koloidal bir amorf jeldir. C-S-H jeli yapısında yaklaşık% 28'lik bir gözenekliliğe sahiptir. C-S-H jeli, sadece taze çimento hamurundaki su dolu kılcal boşluklarda dahi üretilebilir. Bir çimento tanesi tamamen hidrate olduktan sonra C-S-H jelinin hacmi, susuz çimento tanesi ve suyun hacminden % 60 daha fazla hacim gerektirir. Hidratasyon ilerledikçe, kılcal ve jel gözeneklerinin miktarı ve dağılımı önemli ölçüde değişir. Kılcal gözenek hacmi hidratasyon ürünleri ile doldurulur ve jel gözenek hacmi daha fazla jel oluştuğca artar. Ek olarak, toplam gözeneklilikte net bir azalma vardır [58].

Kılcal boşluklar, sertleşmiş çimento hamurunda oluşan hidratasyon ürünlerinin kapladıkları hacimler arasında kalan su ile doldurulmuş boşluklardır. Çimento pastasının kılcal gözenekliliği, su/çimento oranına ve sulanan çimento miktarına, hidratasyon derecesine, mineral veya kimyasal katkı kullanımına ve betona uygulanan kür rejimine göre değişiklik gösterir [59].

Kılcal gözenekler, hidratların, özellikle C-S-H jelinin, başlangıçta suyla doldurulmuş alanda, çöktürmelerleriyle zaman içerisinde değişir. Bu çökeltme işlemleri ve C-S-H jelinin yapısı ve kılcal gözeneklerin sınırları, aşırı düzensiz bir fiziksel yapıya yol açar. Boşluklar arasında iletim büyük kılcal gözenekleri perfore oldukları sürece, yani sürekli bir yol oluşturdıkları sürece hâkimdir. Bununla birlikte, kılcal gözenekler kapanırsa, iletim daha küçük mikro gözenekleri tarafından domine edilir. Kılcal ve jel gözenekleri arasında keskin bir fark yoktur. Ancak, kılcal gözeneklerin oldukça düzensiz bir şekle sahip olduğu ve yüzlerce mikrometreden onlarca nanometreye kadar değişen bir boyuta sahip oldukları düşünülmektedir. Jel gözenek yapısı ise kılcal gözenek boyutunun alt ucuna yani nano boyutu ile örtüşmektedir [58].

Hava boşlukları, jel ve kılcal boşluklarına göre daha büyük (milimetre) boyutlarda birbirleri ile bağlantıları olmayan, düzensiz, küresel şekilli boşluklardır. Sertleşmiş çimento hamurundaki hava boşlukları, betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında istenmeden meydana gelir. Sıkışmış hava boşluklarının boyutu birkaç milimetreye kadar değişir. Betonun karıştırma esnasında sıkışmış hava boşlukları tipik olarak diğer sıkışmış hava boşluklarından ayrılır. Düzensiz oluşan bu hava boşluklarının beton geçirgenliği üzerinde çok az etkisi vardır. Tutulan hava boşlukları, genellikle beton hacminin yaklaşık% 2-6'sı bir miktarda, küresel şekildeki ayrı ayrı kabarcıklardır. Bununla birlikte, çimento hamurunda hava boşlukları, çeşitli kimyasal veya mineral katkılar yardımıyla, karılma işleminin hızı, ortam koşulları, yapılma süresinin iyi ayarlanmasıyla ve kalıba en ideal bir şekilde yerleştirilmesiyle önlenabilir [58].

6. MATERİYAL ve METODOLOJİ

Mineral katkılı betonların buhar kürü ve sıcaklık değişimi altında dayanımlarının incelendiği bu çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri ile karışımlarda kullanılan malzeme miktarları ve numuneler üzerinde uygulanan deneyler hakkında bilgi verilmiştir.

6.1 Deneylerde Kullanılan Materyal ve Özellikleri**6.1.1 Çimento**

Bu çalışma kapsamında deney numunelerinin hazırlanmasında, Adıyaman Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen CEM I 42,5 R tipte TS EN 197-1 standardı ile uyumlu portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento fabrikadan temin edildikten sonra taze olarak kullanılmasına özen gösterilip uygun koşullarda saklanarak tüm karışım serileri için aynı koşullarda kullanılmıştır. Kullanılan portland çimentosuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’de verilmiştir [69].

Çizelge 6.1 Karışımda kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3.09
Priz Süresi	İlk (Dakika)	125
	Son (Dakika)	190
İncelik	Özgül Yüzey (cm ² / gr)	3420

Çizelge 6.2 Karışımda kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Oksit	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	KK	Na ₂ O
Çimento	62,80	19,20	4.25	3,88	3.42	0.34	2.86	2.10

6.1.2 Mineral ve Kimyasal katkıları

Bu çalışmada Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufu olmak üzere 3 tip mineral katkı %15 oranında çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kimyasal bileşiminde beton üretimine zarar verebilecek herhangi zararlı bir bileşene rastlanmamıştır. Ayrıca temin edilen mineral katkıları torbalanmak suretiyle laboratuvar şartlarında muhafaza edilmiştir.

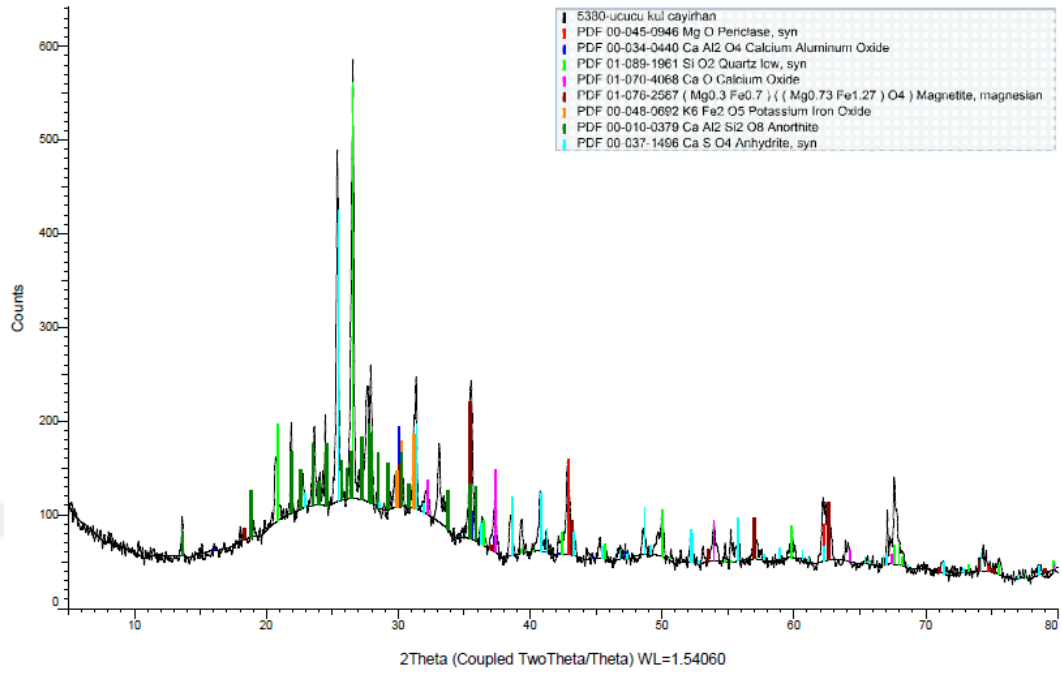
Mineral katılardan uçucu kül, Çayırhan Termik Santralinden antrasit ve taş kömürünün yakılmasıyla elde edilmiştir. Kimyasal bileşiminde bulunan ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) toplamı %70'den fazla olmasından dolayı F sınıfı bir uçucu kül olup ASTM C 618 standardına uygundur [26].

Karışımında kullanılan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna ait kimyasal bileşim oranları Çizelge 6.3' de görülmektedir.

Çizelge 6.3 Kullanılan Mineral Katkıların Kimyasal Bileşimleri

Mineral katkıların kimyasal bileşimleri								
Oksit	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	KK
Uçucu Kül	10,79	50,43	9,56	13,17	3,74	3,45	1,88	0,86
Silis Dumanı	0,74	94,36	0,70	0,81	1,18	0,20	0,86	0,74
Yüksek Fırın Cürufu	39,69	40,10	0,92	7,83	4,26	2,11	1,24	0,63

Bu çalışmada kullanılan uçucu külün mineralojik yapısına ait XRD analiz verileri Resim 6.1'de verilmiştir.



Resim 6.1 Uçucu Küle Ait XRD Analizi

Uçucu küle ait XRD analizi incelendiğinde, kristal yapısında baskın olarak SiO_2 (Kuvartz) piki görünmektedir. Kuvartz pikinin yanı sıra dikkat çekici bir diğer husus ise kristal yapıda bulunan CaSO_4 (anhidrit) yapısıdır [45].

6.1.3 Kimyasal Katkılar

Bu çalışmada sadece silis dumanı katkılı beton karışımlarda işlenebilirliği sağlamak için sika viscocrete Hi-Tech 11W marka yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı çimento ağırlığının %1'i oranında karışıma katılmıştır.

6.1.4 Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılan karışım suyu Türk standartlarına uygun içilebilir nitelikte olup, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Laboratuvarı şebeke suyundan temin edilmiştir.

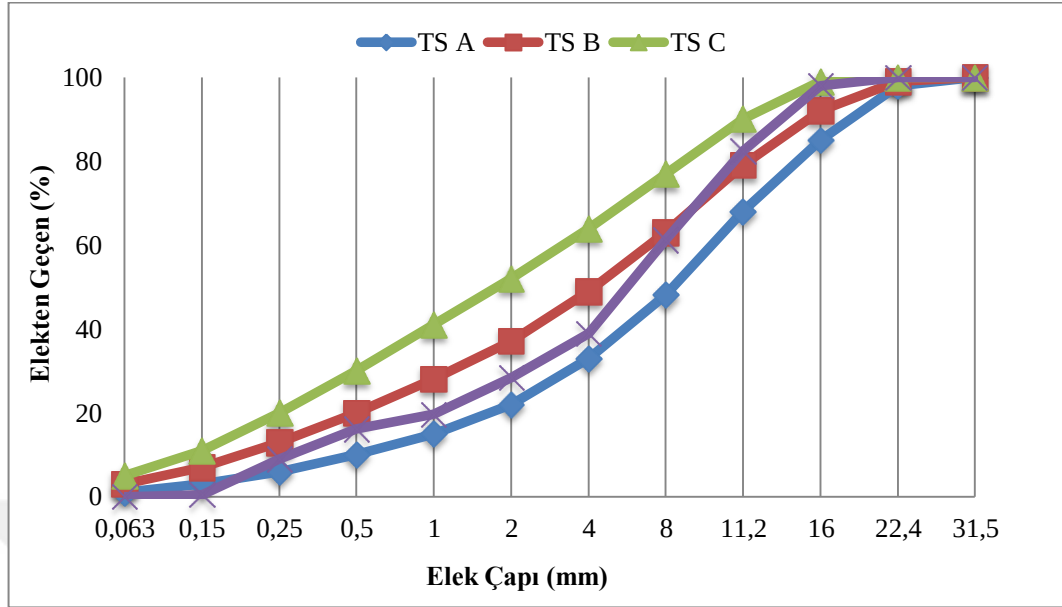
6.1.5 Agreg

Bu çalışmada hazırlanan karışımda ince (0-5 mm), orta (5-12 mm) ve iri (12-22 mm) olmak üzere üç tip kalker agreg kullanılmış olup maksimum agreg tane boyutu 22 mm olarak belirlenmiştir. Karışımda kullanılan agregalar Resim 6.2’de görülmektedir.



Resim 6.2 Elek Analizi İçin Kullanılan Elekler ve Tartım İşlemi

Maksimum tane boyutuna göre hazırlanan karışımın elek analizi TS EN 3530 933-1’e göre yapılmış olup, tane boyut dağılımı TS 802’de belirtilen referans eğrileri arasında kalacak şekilde oluşturulmuştur [70].

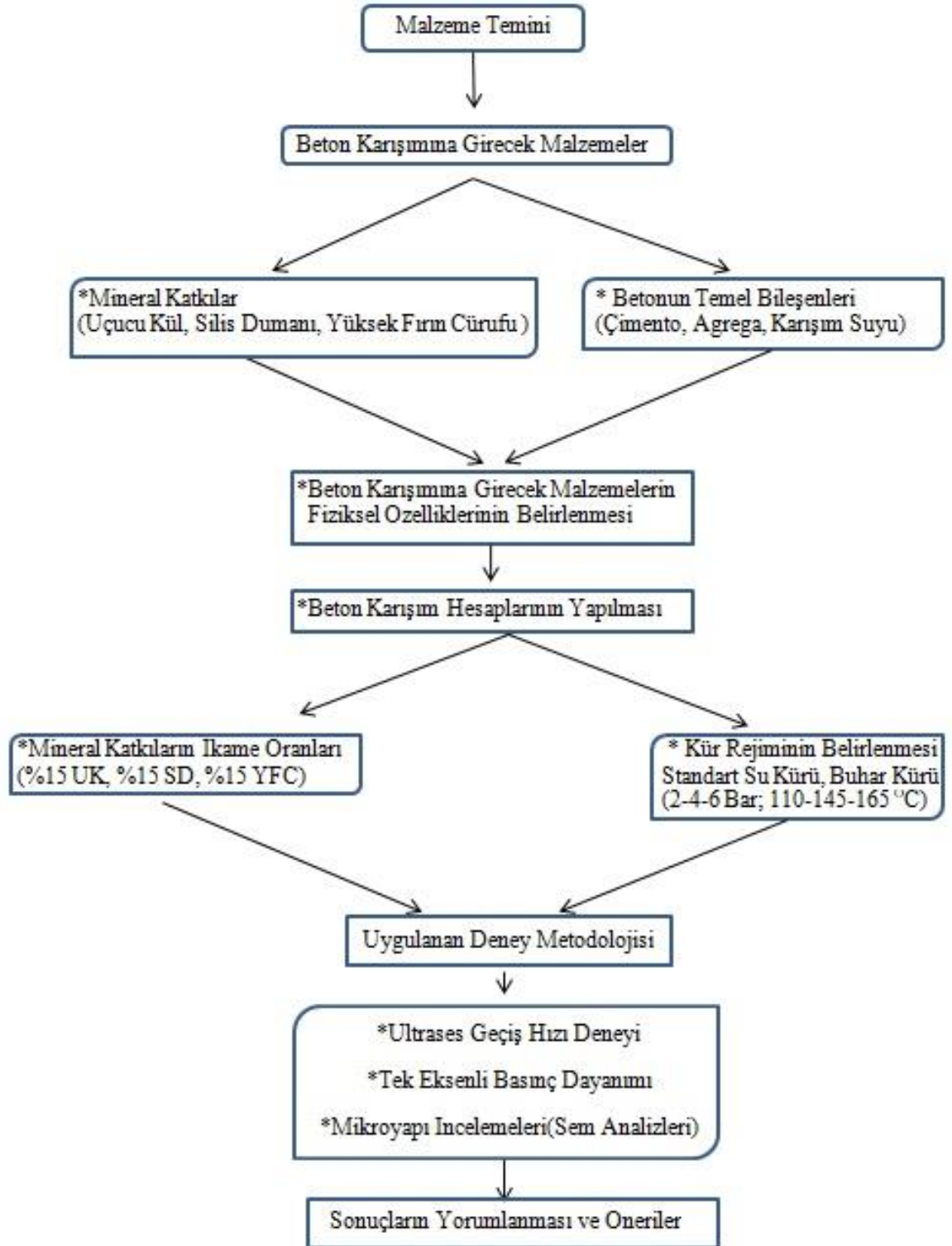


Şekil 6.1 Karışım Agregalarının Granülometri Eğrileri

6.2 Metodoloji

6.2.1 Metodoloji Özeti

Mineral katkılı betonların buhar kürü ve sıcaklık değişimi altında dayanımlarının incelendiği bu çalışma kapsamında yapılan bütün deney çalışmaları aşağıdaki şemada özet halinde sunulmuştur (Resim 6.3).



Resim 6.3 Uygulanan Deney Metodoloji Özeti

6.2.2 Beton Karışımlarının Hazırlanması

Mineral katkılı betonların buhar kürü ve sıcaklık değişimi altında dayanımlarının incelenmesi amacıyla 3 farklı mineral katkı türü ile üretilen karışımlar standart su kürüne ve buhar kürüne tabi tutulmak üzere 7 çeşit beton karışımı oluşturulmuştur.

- Katkısız kontrol betonu
- Uçucu kül katkılı standart su kürüne tabi beton karışımı
- Silis dumanı katkılı standart su kürüne tabi beton karışımı
- Yüksek fırın cürufu katkılı standart su kürüne tabi beton karışımı
- Uçucu kül katkılı buhar kürüne tabi beton karışımı
- Silis dumanı katkılı buhar kürüne tabi beton karışımı
- Yüksek fırın cürufu katkılı buhar kürüne tabi beton karışımı

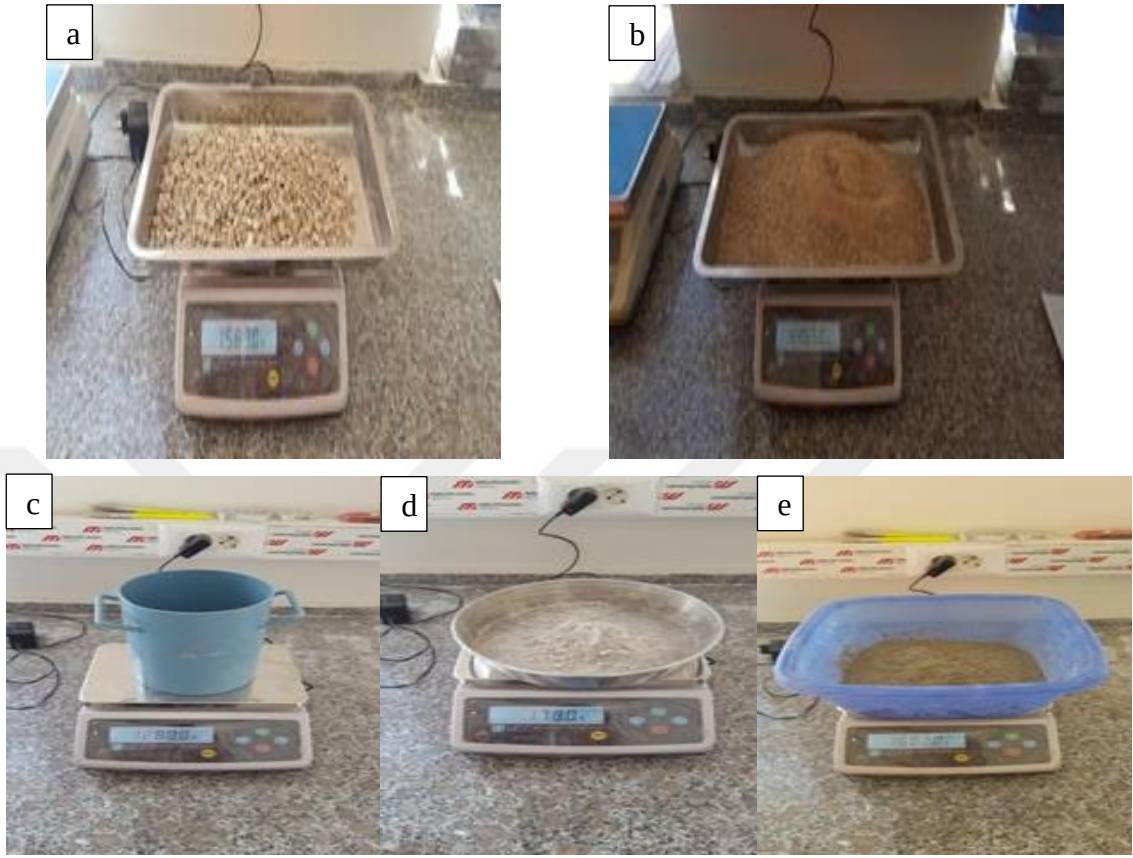
Deney numuneleri TS 802 referans alınarak tasarlanmış olup karışımda kullanılan 1 m³'teki malzeme miktarları Çizelge 6.4'te verilmiştir. Bu kapsamda amaçlanan deneyleri yapmak üzere 7*7*7 cm boyutlara sahip 63 adet küp numune üretilmiştir. Yapılan hesaplamalar 1 m³ beton için yapılmış ve her ayrı çeşit beton serisi için orantı kurularak numuneler üretilmiştir [71].

Çizelge 6.4 Beton Karışım Oranları (kg/m³)

Seri	İnce	Orta	İri	Çimento	Uçucu	Silis	Yüksek	Su	Hava
Adı	Agrega	Agrega	Agrega		Kül	Dumanı	Fırın		
	(0-5	(5-12	(12-22				Cürufu		
	mm)	mm)	mm)						
ŞAHİT	668	618	444	371	-	-	-	204	20
SD	668	618	444	315,35	-	55,65	-	204	20
UK	668	618	444	315,35	55,65	-	-	204	20
YFC	668	618	444	315,35	-	-	55,65	204	20

SD: Silis Dumanı, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek fırın cürufu

Resim 6.4'te beton karışımına girecek olan malzemelerin tartım aşamaları gösterilmiştir.



Resim 6.4 Beton Karışımına Giren Malzemelerin Tartım İşlem Sırası

Resim 6.5'te hazırlanan malzemelerin beton mikserinde karıştırılma işlemleri gösterilmiştir.



Resim 6.5 Beton Karışımının Hazırlanması

Resim 6.6’da hazırlanan beton karışımının önceden yağlanarak hazırlanmış kalıplara yerleştirilmesi gösterilmiştir.



Resim 6.6 Hazırlanan Beton Karışımının Kalıplara Yerleştirilmesi

Hazırlanan küp numuneler 24 saat süreyle muhafaza edildikten sonra zarar verilmeden kalıplardan sökülüştür.



Resim 6.7 Hazırlanan Küp Numunelerin Kalıplardan Çıkarılması

Deney prosesine göre gruplandırılan numuneler kür uygulanmak üzere kür havuzuna ve otoklav cihazına standartlara uygun bir şekilde yerleştirilmiştir.

6.2.3 Uygulanan Kür Rejimleri

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelere standart su kürü ve buhar kürü olmak üzere iki çeşit kür uygulanmıştır.

6.2.3.1 Standart Su Kürü

Bu çalışmada mineral katkılı olarak üretilen numunelerin basınçlı buhar kürü ve sıcaklık değişimi altında dayanımlarının kıyaslanabilmesi için 1 grup numune standart su kürüne tabi tutularak değerlendirmelerde referans alınmıştır. Bu amaçla 24 saat süresince laboratuvar koşullarında bekletilen numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra kür havuzunda 24 ± 2 °C sıcaklıkta 1, 7 ve 28 günlük standart su kürüne tabi tutulmuştur.

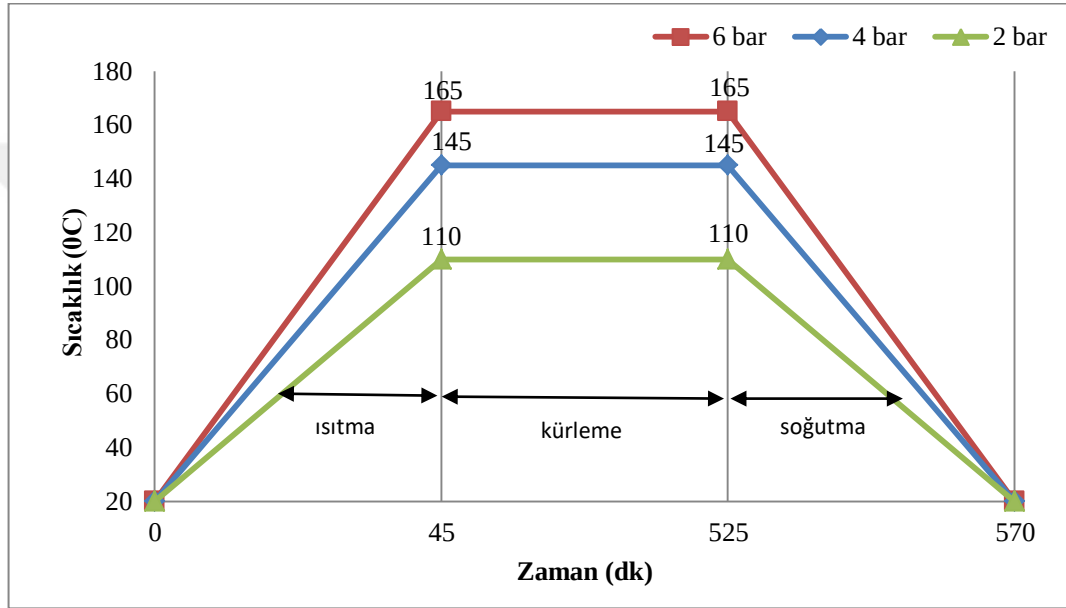


Resim 6.8 Beton numunelerin kür havuzunda kür edilmesi

6.2.3.2 Basınçlı Buhar Kürü

Bu çalışma kapsamında üretilen numuneler gerekli sıkıştırma işlemi yapıldıktan sonra buhar kürüne tabi tutularak 24 saat süresince ön bekleme alınmıştır. Bu bekleme süresi sonunda numuneler kalıplardan çıkarılarak hassas terazi ile ağırlıkları ölçülüp ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Buhar kürü öncesi yapılan ölçümler kür sonrasında da yapılmak üzere numuneler otoklav cihazı

içerisine yerleştirilmiştir. Küre başlamadan önce kabin içi ve ortam sıcaklığı ölçülmüş genelde aynı olduğu saptanmıştır. Otoklav kabin içerisine belirli miktarda su koyulduğundan % 100 bağıl neme sahip olduğu kabul edilmiştir. Numunelerin yerleştirme işlemi yapıldıktan sonra küre başlamak üzere kapağı kapatılarak periyodik zaman aralıklarında okumalar yapılarak kabin içerisinin istenilen maksimum sıcaklıkta kalması için manuel ayarlamalar yapılmıştır.



Şekil 6.2 Uygulanan Kür Rejimi



Resim 6.9 Beton numunelerin otoklav içerisinde kür edilmesi

Bu çalışma kapsamında deney numuneleri otoklav içerisinde 2-4-6 bar olmak üzere 3 farklı basınçta ve 110-145-165 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklık altında 8

saatlik küre tabi tutulmuşlardır. Maksimum kür sıcaklığına gelinceye kadar 45 dk kontrollü ısıtma ve kür işlemi yapıldıktan sonrada 45 dk'lık kontrollü soğutma yapılarak oda sıcaklığına gelinceye kadar otoklav içerisinde bekletilmişlerdir. Kür sonucunda numuneler kabinden çıkarılarak hassas terazi ile ağırlıkları ölçülüp ultrases geçiş hızı ölçümleri yapılarak kür öncesi ve kür sonrası kıyaslama yapılmak üzere veriler alınmıştır.

6.2.4 Basınç Dayanımı Deneyi

Üretilen numuneler standart su kürü ve buhar kürüne tabi tutulduktan sonra birim ağırlıkları tespit edilip Ultrases geçiş hızı da belirlendikten sonra 63 adet beton numune her yaş için 3'er adet 7*7*7cm ölçülerindeki küp numunelere 6 kgf/cm².sn'lik sabit bir yükleme hızı ile 200 tonluk basınç presinde işleme tabi tutulmuştur.

Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla basınçlı buhar kürü ve standart kür uygulanan numuneler üzerinde tek eksenli basınç dayanımı deneyleri TS EN 12390-3 referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı değerleri eşitlik (7.1) yardımı ile hesaplanmıştır [72].

$$f_{ck} = \frac{P}{A_0} \quad (7.1)$$

Denklemde; f_{ck} , karakteristik basınç dayanımı (N/mm²), P, uygulanan kuvvet (N) ve A_0 , yüzey alanı (mm²)'dir.



Resim 6.10 Beton Numunelerin Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

6.2.5 Ultrases Geçiş Hızı Ölçümleri

Ultrases geçiş hız ölçümleri, standart su kürü uygulanan numunelerde kür öncesi ve kürden çıkarıldıktan sonra kırılma gününde, buhar kürü uygulanan numunelerde ise ısıtıl işlem çevriminin öncesinde ve kür rejiminin tamamlanmasından hemen sonra birim ağırlıkları ölçümleri ile birlikte yapılmıştır. Kür öncesi ve sonrası elde edilen sonuçların ortalaması alınarak dayanıma etkisi irdelenmiştir. Ölçümlere başlamadan önce kalibrasyon çubuğu ile ultrases cihazının kalibrasyonu doğrulanmıştır. Deney aleti kablolarına bağlı alıcı ve verici problemlerin dayanımı belirlenecek numunenin, beton yüzeyinde boşluk kalmayacak şekilde ultrason jeli sürülerek karşılıklı iki yüzeyde ASTM C 597 standardına uygun olarak ultrases geçiş süreleri ölçülmüş ve sonrasında aynı işlem diğer iki yüzeyden de yapılarak 2 farklı yüzeyden ölçülen ultrases geçiş sürelerinin ortalamaları alınarak sonuca varılmıştır (Resim 6.11). Aynı işlem su muhtevası azaltılan diğer beton örneklerine de uygulanmıştır. Ölçüm işlemleri 1,7 ve 28 günlük örnekler için de sırasıyla tekrarlanmıştır. Bu deney ile betonun içerisine gönderilen ses dalgasının numunenin bir yüzeyinden diğer yüzüne geçme süresi ölçülerek dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu dalga hızı ile gerekli formülasyonlar sonucunda betonun basınç dayanımı ile ilişkilendirilmektedir [3].

Ultrases geçiş hızı okumaları otoklav öncesi ve sonrasında ASTM C 597'ye uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney örneklerinin ultrases geçiş hızı hesaplamalarında eşitlik (7.2)'den faydalanılmıştır [73].

$$Vp = \frac{L}{t} \quad (7.2)$$

Denklemde; Vp , geçiş hızı, (km/sn), t , geçiş süresi (sn) ve L , ölçüm yapılan uzunluk (km)'dur.



Resim 6.11 Beton Numunelerin Ultrases Ölçümlerinin Yapılması

6.2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu İle Mikroyapı Çalışmaları

Bu çalışmada mikroyapı çalışmaları kısmında, deney örnekleri küçük kesitler halinde çıkartıldıktan sonra karbon kaplama yapılarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazında incelenmeye hazır hale getirilmişlerdir. Örneklerin gözenek yapısı fotoğraflama işlemleri Zeiss marka EVO LS 10 modelinde SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



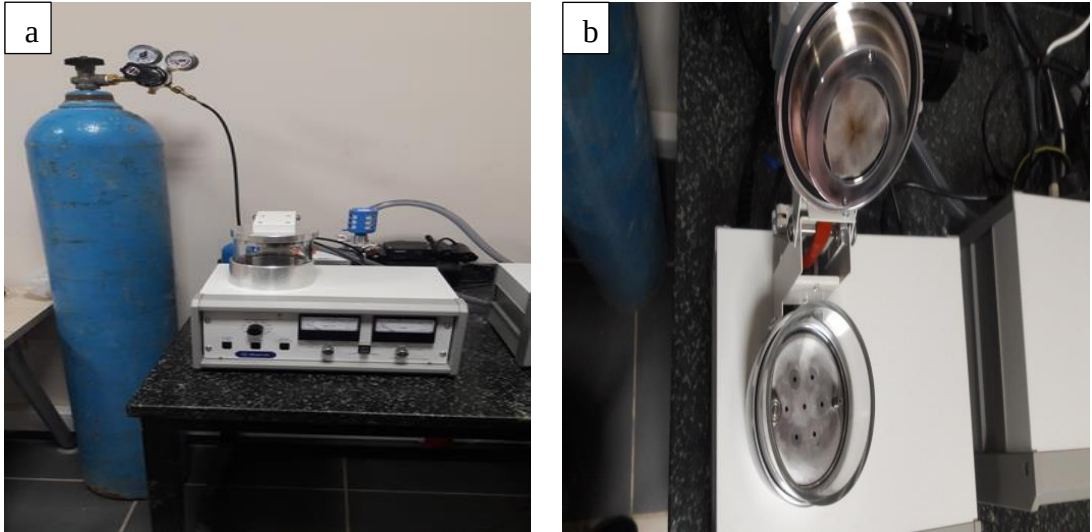
Resim 6.12 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Mikroyapı çalışmaları için öncelikle silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanılarak farklı sıcaklık ve basınç koşullarında hazırlanmış numunelerden kesitler alınmıştır. Uygun boyutlarda alınmış olan numuneler görüntü alınabilmesi için ilk olarak kaplama yapılmak üzere numune hazırlama odasına alınmıştır (Resim 6.13).



Resim 6.13 Numune Kaplama Cihazı

Burada ‘stub’ adlı numune tutucu üzerine sırasıyla karbon bandı ve numune yerleştirilmiştir (bu sayede numunenin tutucuya yapışması sağlanmış ve numunede herhangi bir değişikliğin oluşması engellenmiştir). Ardından numuneler kaplama cihazına uygun şekilde yerleştirilmiş ve altın-paladyumla kaplama yapılmıştır (Resim 6.14).



Resim 6.14 Numunelere Kaplama Yapılma Anı; a) Kaplama Cihazı, b) Kaplama Hücresi

Kaplaması yapılan numuneler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Laboratuvarı’na götürülmüştür. Numuneler cihaza yerleştirilmiş (Resim 6.15) ve ilk olarak vakumlama işlemi yapılmıştır. Bu işlemle birlikte görüntülerin bilgisayara aktarılması sağlanmış ve uygun bölgelerden görüntü alınmıştır.



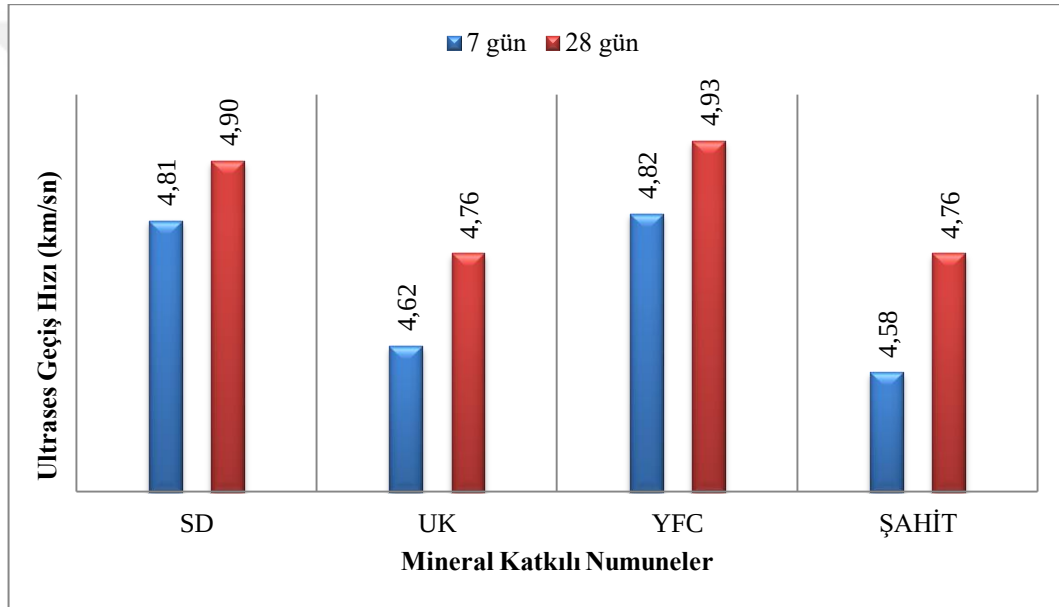
Resim 6.15 Numunelerin SEM Cihazına Yerleştirilme Anı

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

7.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerden Elde Edilen Bulgular

7.1.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları

Mineral katkılı beton deney örnekleri ile standart su kürüne tabi tutulan şahit deney örneklerinin ultrases geçiş hızları ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırmaya ilişkin bulgular Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1 Standart Su Kürüne Tabi Tutulmuş Mineral Katkılı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

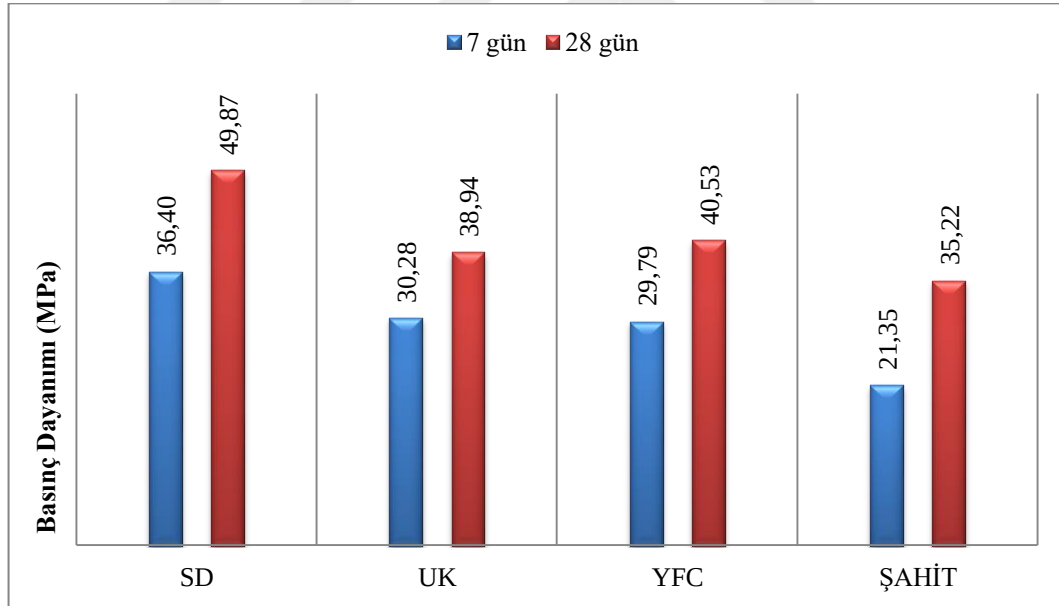
Standart su kürüne tabi tutulmuş mineral katkılı olarak üretilen tüm serilerde 28 günlük numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri 7 günlük numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı numunelerin ultrases geçiş hızı bulguları uçucu kül katkılı ve şahit numunelere göre daha yüksek olup, bu değerler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise çok fazla bir fark gözlenmemiştir. Silis dumanı katkılı 28 günlük örneklerin geçiş hızı ortalaması 4.90 km/sn iken, yüksek fırın cürufu katkılı 28 günlük örneklerin bu değeri ise 4.93 km/sn olarak bulunmuştur.

7.1.2 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Basınç Dayanımları

Çizelge 7.1’de standart su kürüne tabi tutulan deney örneklerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımındaki artışlar yüzdesel olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1 Standart Su Kürü Basınç Dayanımı Bulguları

Seri Adı	7 Günlük Dayanım (MPa)	Artış (%)	28 Günlük Dayanım (MPa)	Artış (%)
ŞAHİT	21.35	-	35.22	-
SD	36.40	70.49	49.87	41.59
UK	30.28	41.82	38.94	10.56
YFC	29.79	39.53	40.53	15.07



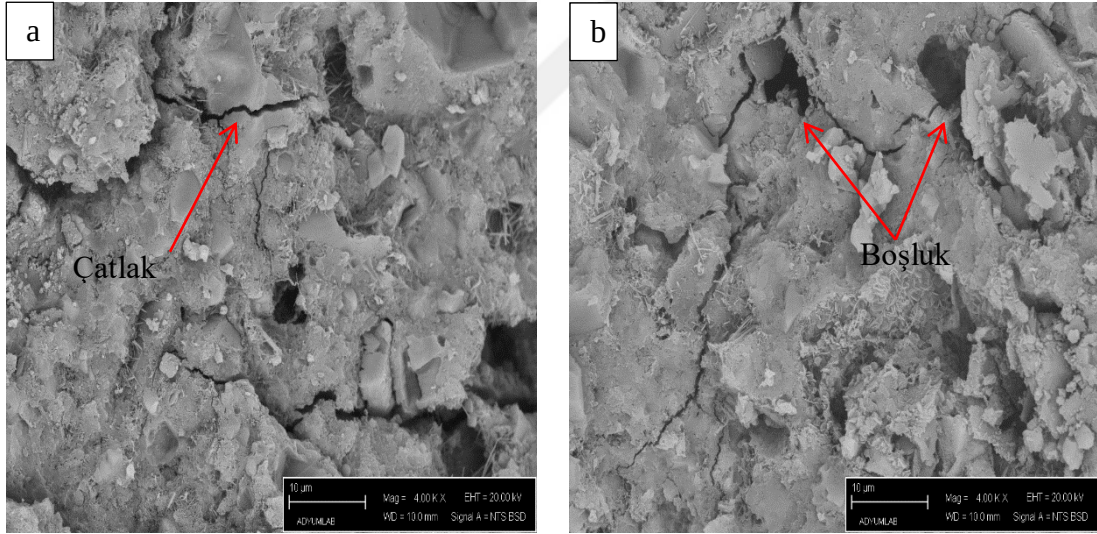
Şekil 7.2 Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımı Bulguları

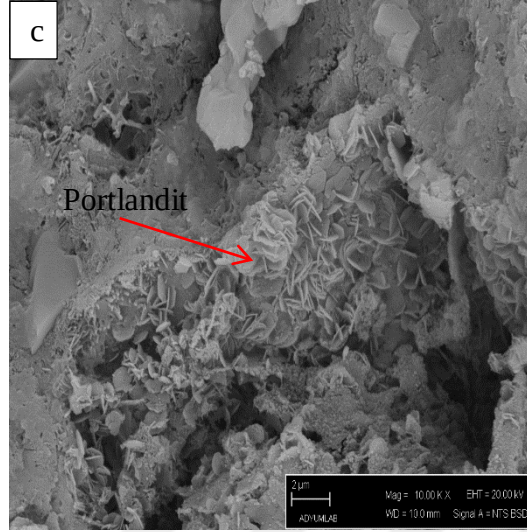
Çizelge 7.1’de standart su kürüne tabi tutulan deney örneklerinin 7 günlük basınç dayanımındaki artış oranlarında şahit numuneye kıyasla %70.49’luk bir artışla Silis Dumanı katkıli beton numunelerinde olduğu tespit edilmiştir. En düşük katkıyı ise %39.53’lük artış ile Uçucu Kül katkı ilavesiyle üretilen numunelerde olduğu görülmüştür. 28 günlük dayanım verileri incelendiğinde ise Silis Dumanı katkıli

betonlarda %41.59, Uçucu Kül katkılı betonlarda %10.56, Yüksek Fırın Cürufu katkılı betonlarda ise %15.07 olarak elde edilmiştir. İkame edilen mineral katkıların çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç ile reaksiyona girmesi yeni C-S-H jellerinin oluşmasına dolayısıyla dayanımın da artmasına sebep olduğu söylenebilir. Ayrıca standart su kürüne tabi tutulan Silis Dumanı, Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu ikameli betonların 28 günlük basınç dayanımları kıyaslandığında, Silis Dumanı katkılı beton numunelerinin Kalsiyum Hidroksit ile birleşerek yeni C-S-H jellerinin oluşumuna sebep olduğu dolayısıyla basınç dayanımındaki artışın daha fazla olmasına sebep olduğu görülmektedir.

7.1.3 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Mikroyapı Bulguları

Resim 7.1’de Silis Dumanı katkılı standart su kürüne tabi tutulan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.

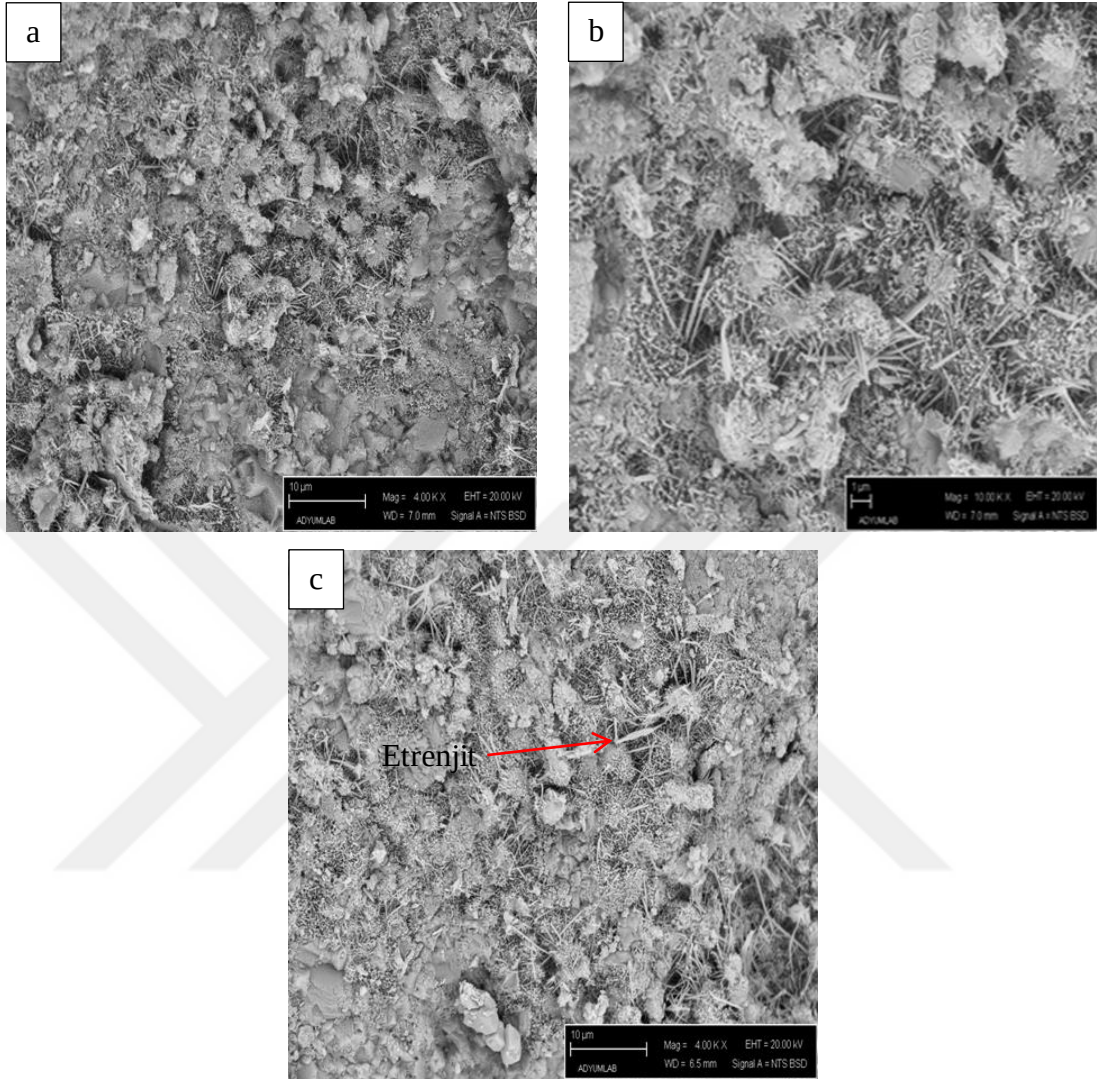




Resim 7.1 Silis Dumanı Katkılı Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

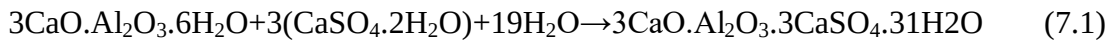
Resim 7.1’de taramalı elektron mikroskopuyla elde edilen mikro yapı görüntüleri incelendiğinde silis dumanı katkılı numunelerde taneciklerin etkileşim halinde olması ve hidrasyon ürünlerinin oluşmasıyla beraber çeşitli çap ve uzunlukta çatlakların ve boşluklu yapının oluştuğu görülmektedir. Görülen bu poroz yapıyla beraber az miktarda Portlandit (CH) oluşumuna da rastlanmıştır. Bu boşluklu yapının ikame edilen silis dumanı taneciklerinin çok ince yapıda olması ve yüksek su emme kapasitesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Ayrıca hidrasyon mekanizmasının gelişmeye başlaması ve bu mekanizmaya dışarıdan etki eden yüksek sıcaklık ve buhar basıncının, kılcal çatlakların oluşumuna ve bunların derin çatlaklara dönüşmesine neden olduğu söylenebilir.

Resim 7.2’de Uçucu kül katkılı olarak üretilen standart su kürüne tabi tutulan şahit numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.2 Uçucu kül katkıli standart su kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri

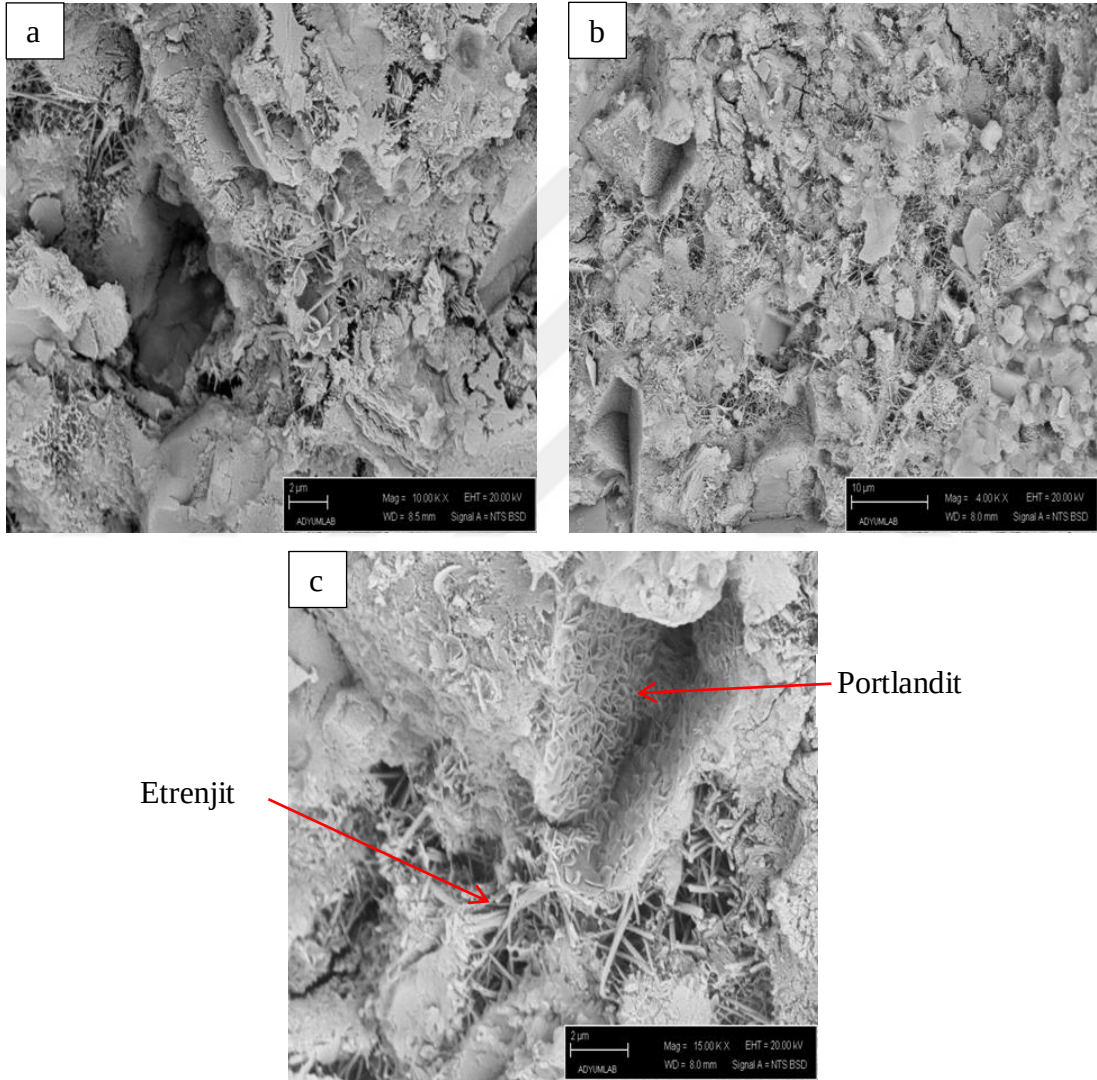
Mikroyapı görüntüleri incelenen uçucu kül katkıli örnekte etrenjit oluşumuna rastlanmıştır. Etrenjit oluşumuna ilişkin kimyasal reaksiyon Denklem 7.1’de verilmiştir [66].



Elde edilen erken dönem dayanım verileri incelendiğinde, etrenjitin ilk günlerde dayanımı pozitif yönde etkilediği ancak nihai dayanımda düşüşe sebep olduğu söylenebilir. Etrenjitin oluşum reaksiyonları sonucu açığa çıkan ürünler, yüksek su emme kapasitesine sahip jel yapılarıdır. Bu durum mikro yapıda etrenjit

jellerinin yüksek su emme kapasitesine sahip yapılarından dolayı jel yapının hacim genişlemesine, mikro yapıda içsel gerilmelerin artmasına ve nihai dayanımın düşmesine sebep olarak gösterilebilir.

Resim 7.3'te Yüksek fırın cürufu katkılı standart su kürüne tabi tutulan şahit numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.3 Yüksek fırın cürufu katkılı standart su kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri

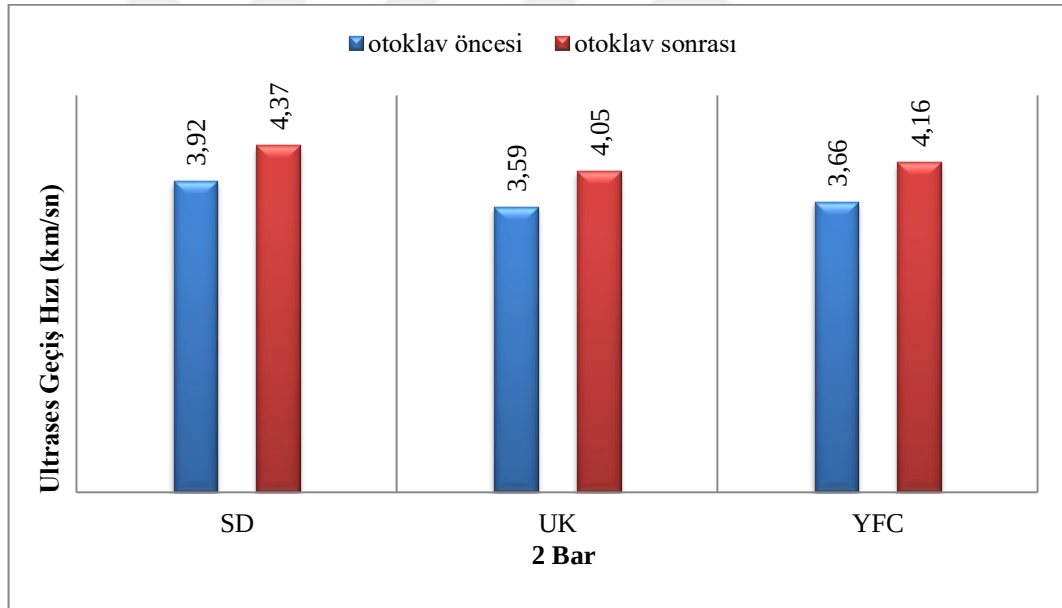
Yüksek fırın cürufu ile üretilen örneklerin mikro yapısında yer yer etrenjit oluşumu görülmüş ve portlandit yapısına rastlanmıştır. Portlandit varlığının, mikro yapı içerisinde halen serbest kirecin bulunduğu bir göstergesi olduğu

söylenbilir. Ayrıca incelenen SEM görüntülerde boşluk ve çatlaklar içerisinde etrenjit mineralinin oluşumu oldukça dikkat çekicidir.

7.2 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Veriler

7.2.1 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları

Şekil 7.3'te mineral katkılı deney örneklerinin 2 bar basınçlı otoklav kürüne tabi tutulması sonucunda elde edilmiş ultrases geçiş hızı bulguları verilmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyi otoklav öncesi ve otoklav sonrasında gerçekleştirilmiş olup, otoklav kürünün etkisiyle geçiş hızındaki değişim belirlenmiştir.



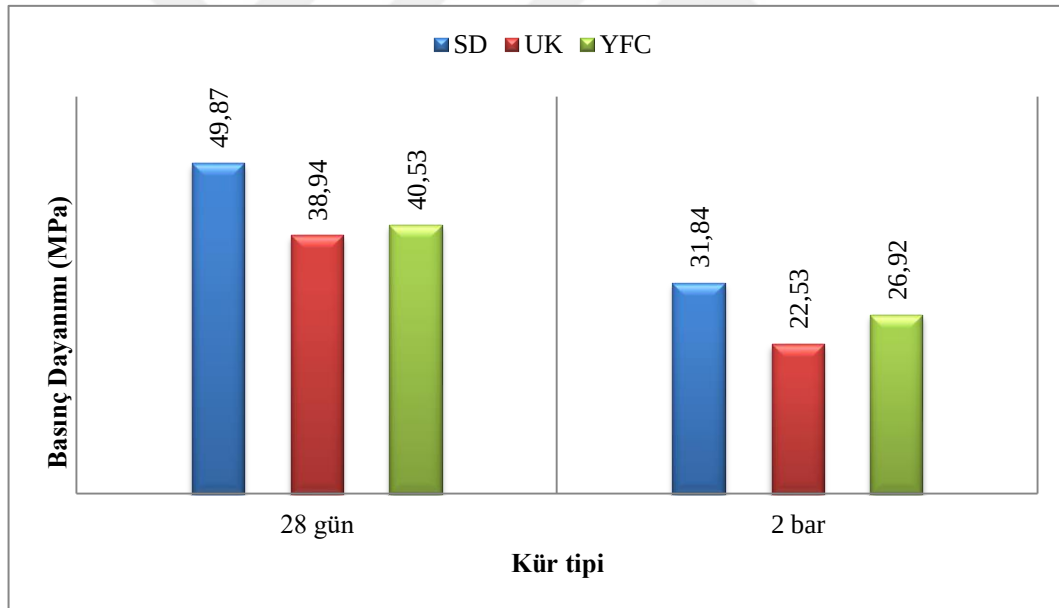
Şekil 7.3 2 Bar Buhar Basıncı Altında Kür Edilen Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Verileri

Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı numunelerin ultrases geçiş hızı bulguları uçucu kül katkılı numunelere göre daha yüksek olup, bu değerler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise çok fazla bir fark gözlenmemiştir. Silis dumanı katkılı örneklerin otoklav sonrasındaki geçiş hızı ortalaması 4.37 km/sn iken, yüksek fırın cürufu katkılı örneklerin otoklav sonrasındaki bu değeri ise 4.16 km/sn olarak bulunmuştur. 2 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan tüm serilerin ultrases geçiş

hızında artış tespit edilmiştir. Bütün mineral katkılı serilerde ultrases geçiş hızı verilerindeki artışın otoklav kürü sayesinde kazanıldığı düşünülmektedir. Otoklav kürü ile betonun buhar basıncına ve neme maruz kalmasıyla hidratasyon mekanizmasının geliştiği ve buna bağlı olarak daha yoğun bir şekilde hidratasyon ürünlerinin ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bu durumun betonun kompasitesini artırarak ultrases geçiş hızı verilerindeki yükselişe neden olduğu söylenebilir.

7.2.2 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınc Dayanımları

Mineral katkı ikameli betonların 2 bar basınçlı otoklav kürü sonrasındaki basınç dayanımlarına ilişkin bulgular Şekil 7.4'te verilmiştir.



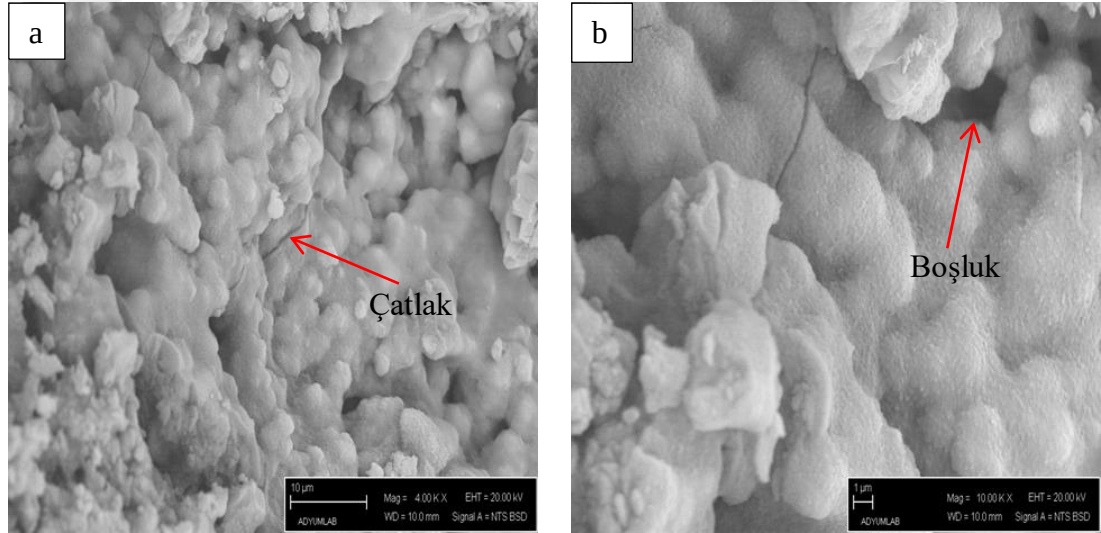
Şekil 7.4 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınc Dayanımları

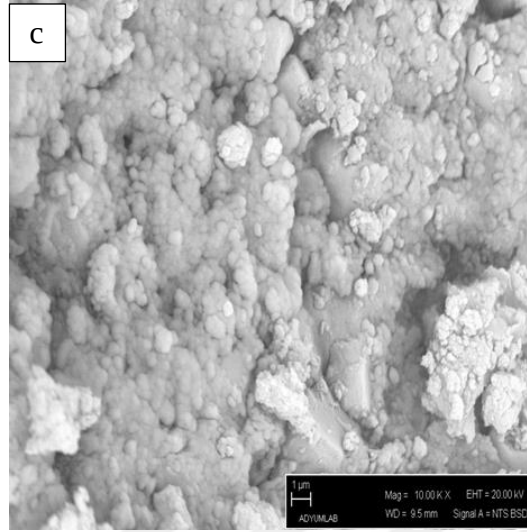
2 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin elde edilen basınç dayanımı verilerine göre silis dumanı katkılı numunelerin 31.84 MPa değeri ile yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı numunelere göre daha yüksek dayanım değerleri elde ettiği tespit edilmiştir. Standart su kürüne tabi tutulan deney örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları ile kıyaslandığında en fazla düşüşü %

42.14 ile Uçucu Kül katkılı numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir. Mineral katkı ikamesiyle üretilen numunelerin kimyasal yapılarındaki amorf silisin serbest kireci ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bağlama yeteneği olarak ifade edilen puzolanik aktivitesi, içeriğindeki silis miktarına bağlı olarak artış gösterir. Bu mikro yapıda yoğun hidrasyon ürünlerinin oluşumuna katkı sağlarken mineral katkıların tanecik yapısının çimento tanelerine kıyasla küçük olmasından dolayı yüksek su emme ihtiyacını doğurmaktadır. Betonun su ihtiyacının artması ve bunu karşılayamaması nedeniyle kuruma küçülmesi olayının meydana gelmesine bağlı olarak kılcal çatlakların derinleştiği düşünülmektedir. Elde edilen SEM görüntülerindeki bu bulguların varlığı bunu destekler niteliktedir.

7.2.3 2 Bar Basıncı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikro Yapı Bulguları

Resim 7.4’de Silis Dumanı katkılı 2 bar basıncı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

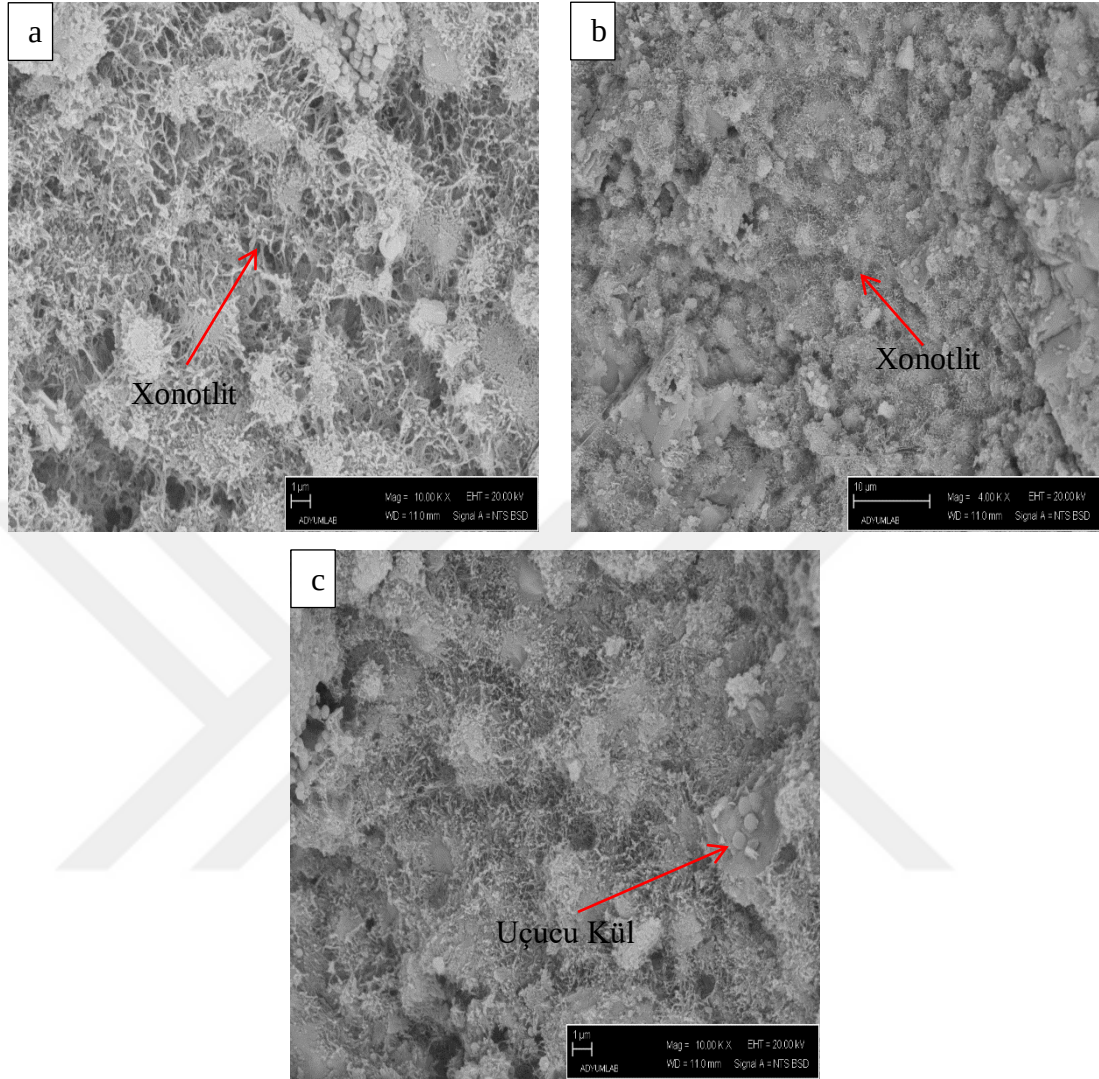




Resim 7.4 Silis Dumanı Katkılı 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Silis Dumanı katkı 2 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerin 4000 ve 10000 büyütme sonucunda elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde Resim 7.4a’ de yoğun C-S-H jel yapısı içerisinde kılcal çatlakların ve boşluklu yapının olduğu gözlemlenmiştir. Resim 7.4b’ de 10000 büyütme sonucunda elde edilen SEM görüntüleri ile oluşan çatlaklı ve boşluklu yapı net olarak görülebilmektedir. Resim 7.4c’de elde edilen veriler ile oluşan serbest kireç yapıları tespit edilmiştir. Çimento ile %15 ikame edilerek kullanılan silis dumanı tane yapısının çimento hamuru-agrega ara fazı arasındaki bağlantıyı daha kohezif hale getirerek, dayanımda artış yönünde bir oluşum beklenirken portlandit yapının oluşturduğu boşluk ve kür rejimine bağlı kılcal çatlakların varlığı basınç dayanımında yaşanan azalmaya sebep olarak gösterilebilir.

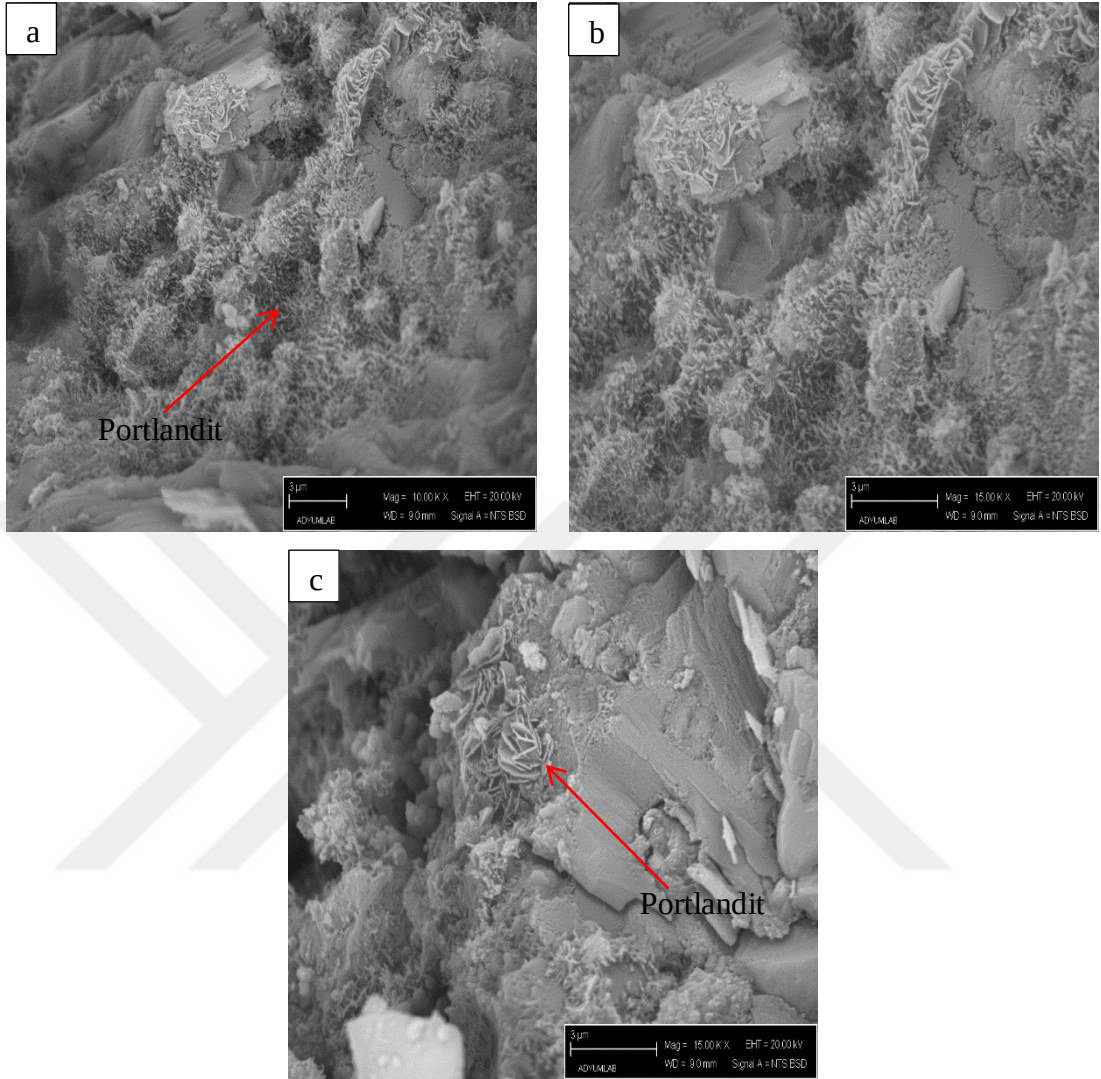
Resim 7.5’de Uçucu Kül katkı 2 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Resim 7.5 Uçucu Kül Katkılı 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Resim 7.5a’ da verilen 2 bar buhar basıncına tabi tutulan Uçucu kül katkılı numunelerin SEM görüntüleme tekniği ile elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde C-S-H jel yapısının xonotlit yapıya dönüşmeye başladığı görülmüştür. Resim 7.5b’de uçucu kül ile üretilen seride gözlemlenen xonotlit yapılarına ait SEM görüntüleri verilmiştir. Resim 7.5c’de ise yer yer küresel yapıda içi dolu uçucu kül tanecikleri gözlemlenmiştir.

Resim 7.6’da Yüksek Fırın Cürufu katkılı 2 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



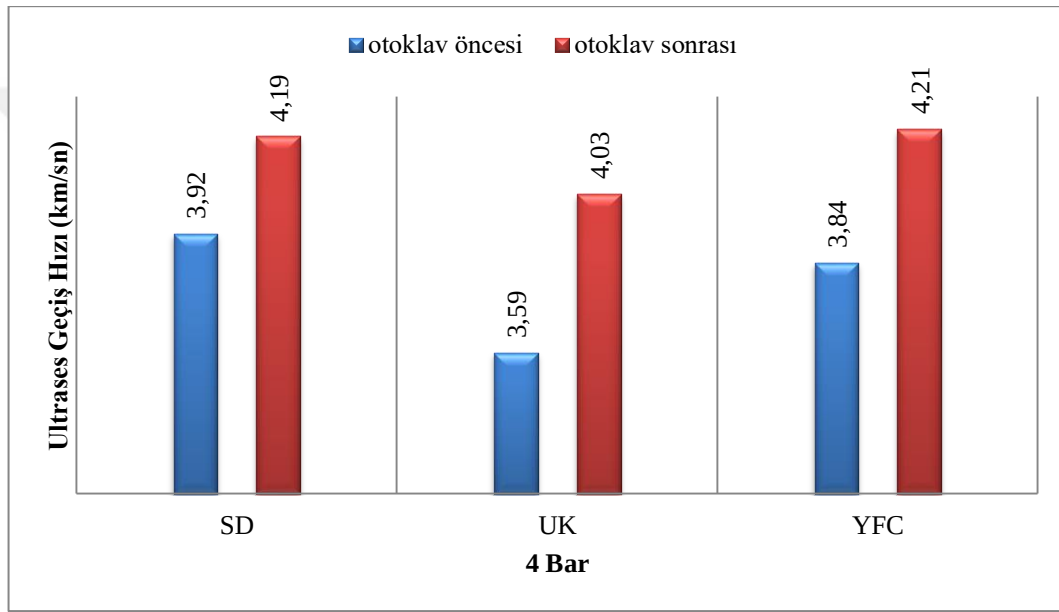
Resim 7.6 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı 2 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Resim 7.6'da yüksek fırın cürufu ile üretilen serilere ait SEM görüntüleri incelendiğinde boşluklu yapı oluşturarak betonun dayanımında düşüşe sebep olan Portlandit yapının görüldüğü tespit edilmiştir.

7.3 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Bulgular

7.3.1 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları

Şekil 7.5’de mineral katkılı deney örneklerinin 2 bar basınçlı otoklav kürüne tabi tutulması sonucunda elde edilmiş ultrases geçiş hızı bulguları verilmiştir.

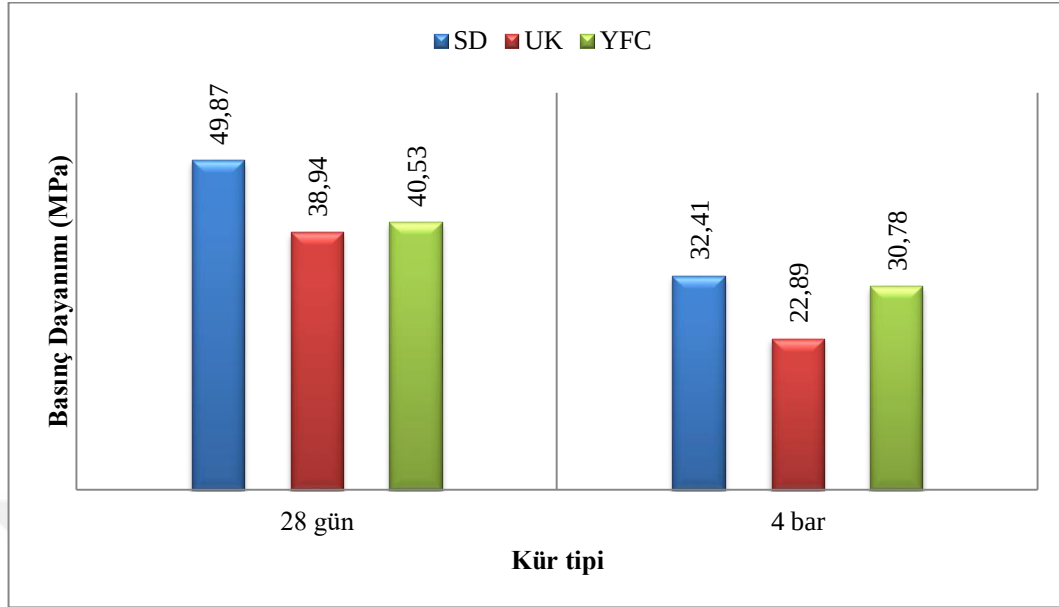


Şekil 7.5 4 Bar Buhar Basıncı Altında Üretilen Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

Otoklavda 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin kür sonrasında tüm serilerin ultrases geçiş hızında artış tespit edilmiştir.

7.3.2 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları

Şekil 7.6 ile 4 bar buhar basınçlı otoklav kürüne tabi tutulan mineral katkılı numunelerin ve standart su kürüne tabi tutulan numunelerin 28 günlük basınç dayanımı bulguları verilmiştir.

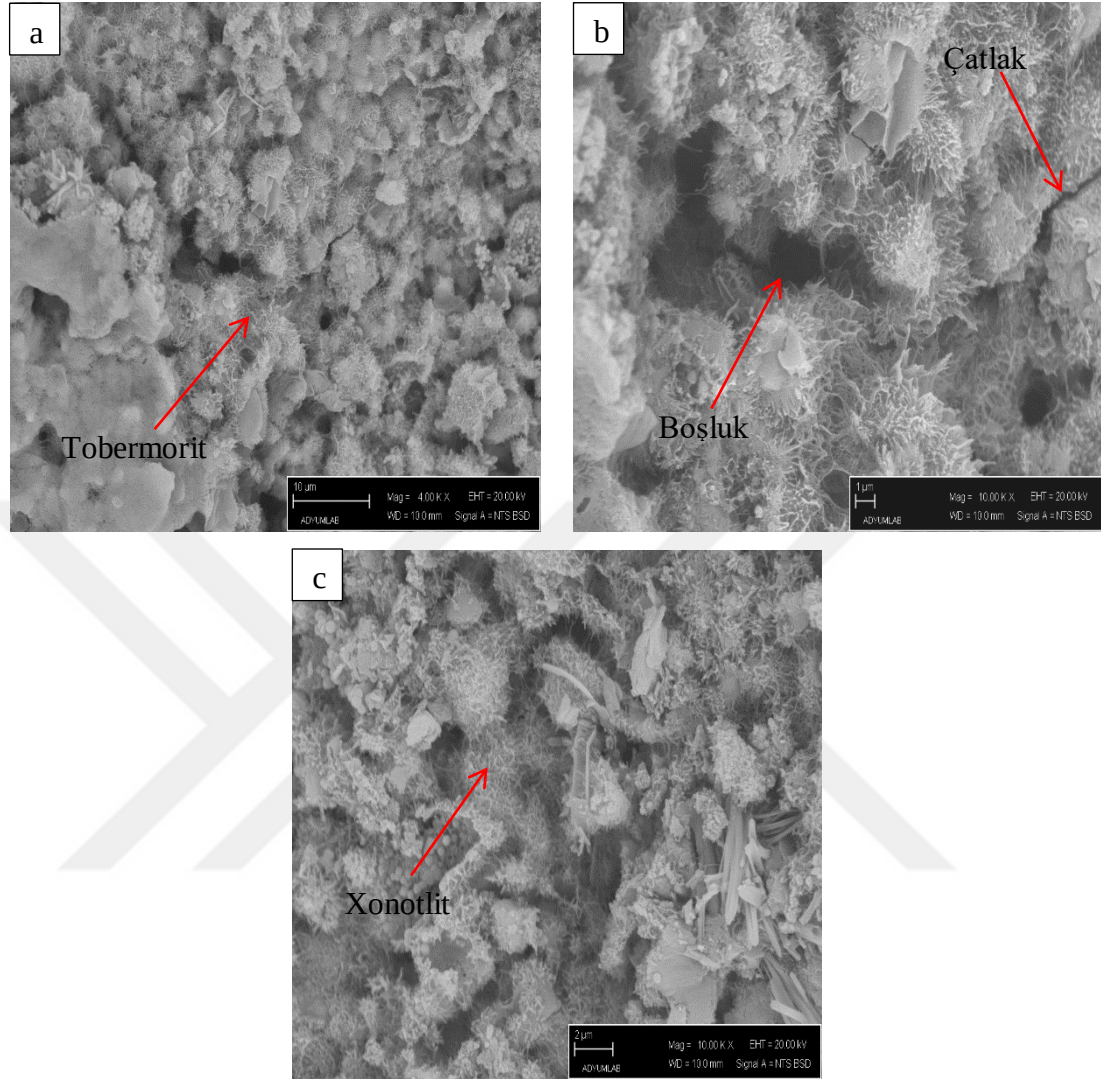


Şekil 7.6 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları

Şekil 7.6'da 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan deney örneklerinin basınç dayanımları incelendiğinde Silis Dumanı katkılı numunelerin 32.41 MPa, Uçucu Kül katkılı numunelerin 22.89 MPa ve Yüksek Fırın Cürufu katkılı numunelerin 30.78 MPa basınç dayanımlarına sahip olduğu görülmüştür. Standart su kürüne tabi tutulan deney örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları ile kıyaslandığında en fazla düşüşü %41.21 ile Uçucu Kül katkılı numunelerin gösterdiği tespit edilmiştir. Silis Dumanı katkılı numuneler %35.01, Yüksek Fırın Cürufu katkılı numunelerin ise %24.06 azalış gösterdiği tespit edilmiştir.

7.3.3 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları

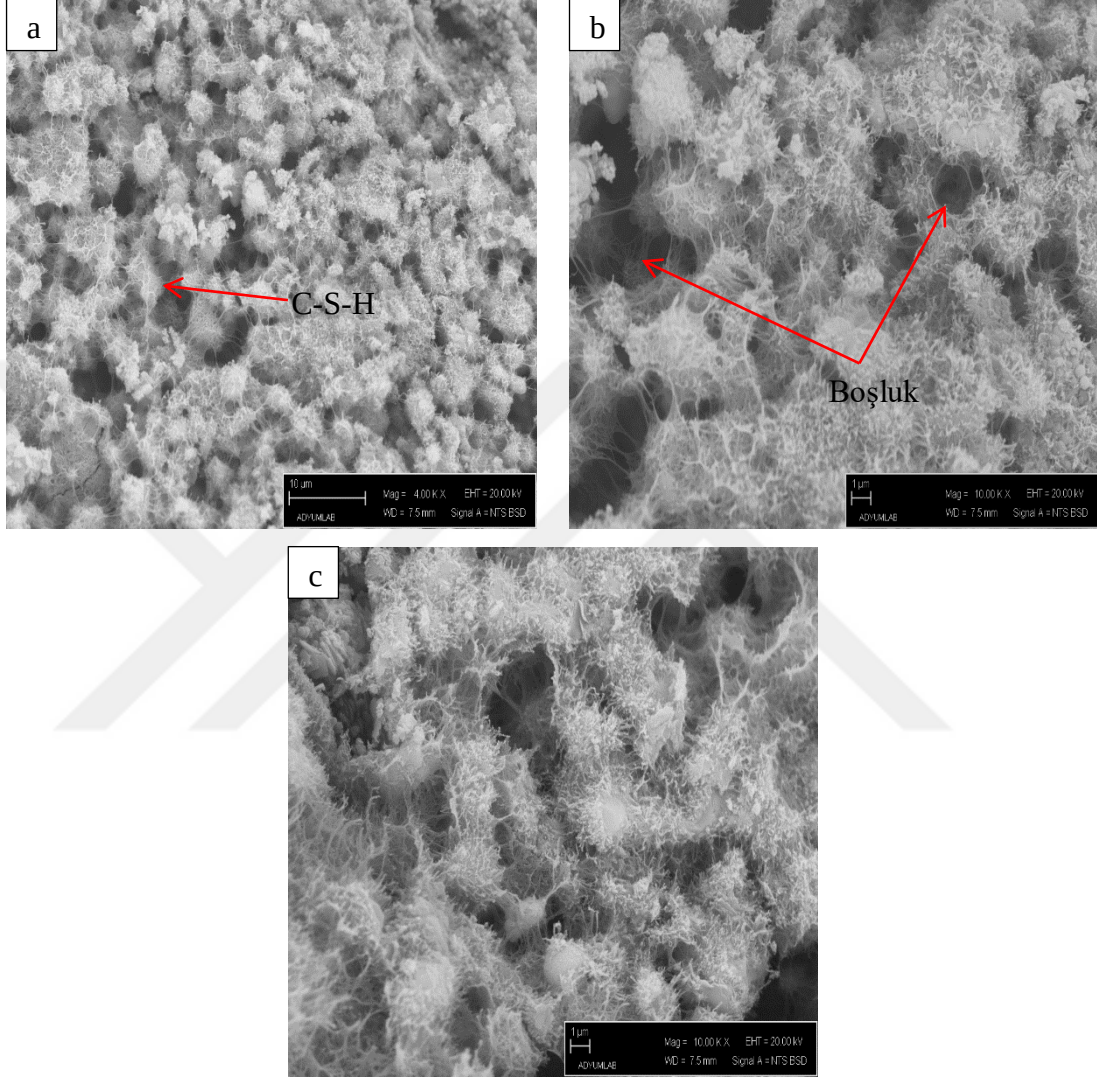
Silis Dumanı katkılı 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.7'de verilmiştir.



Resim 7.7 Silis Dumanı Katkılı 4 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Silis Dumanı katkılı 4 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde sıcaklık yükseldikçe malzemenin mikro yapısında tobermorit yapısının oluşmaya başladığı ve yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle oluşan çatlakların derinleşmeye başladığı görülmüştür. Resim 7.7b’de silis dumanı ile üretilen seride gözlemlenen xonotlit yapının oluşmaya başladığı SEM görüntülerinde tespit edilmiştir. Tobermorit yapısının daha yoğun bir şekilde oluşması ve gelişmesi için gerekli olan sıcaklık ve basınç eksenindeki kür ortamının yetersiz kaldığı düşünülmektedir.

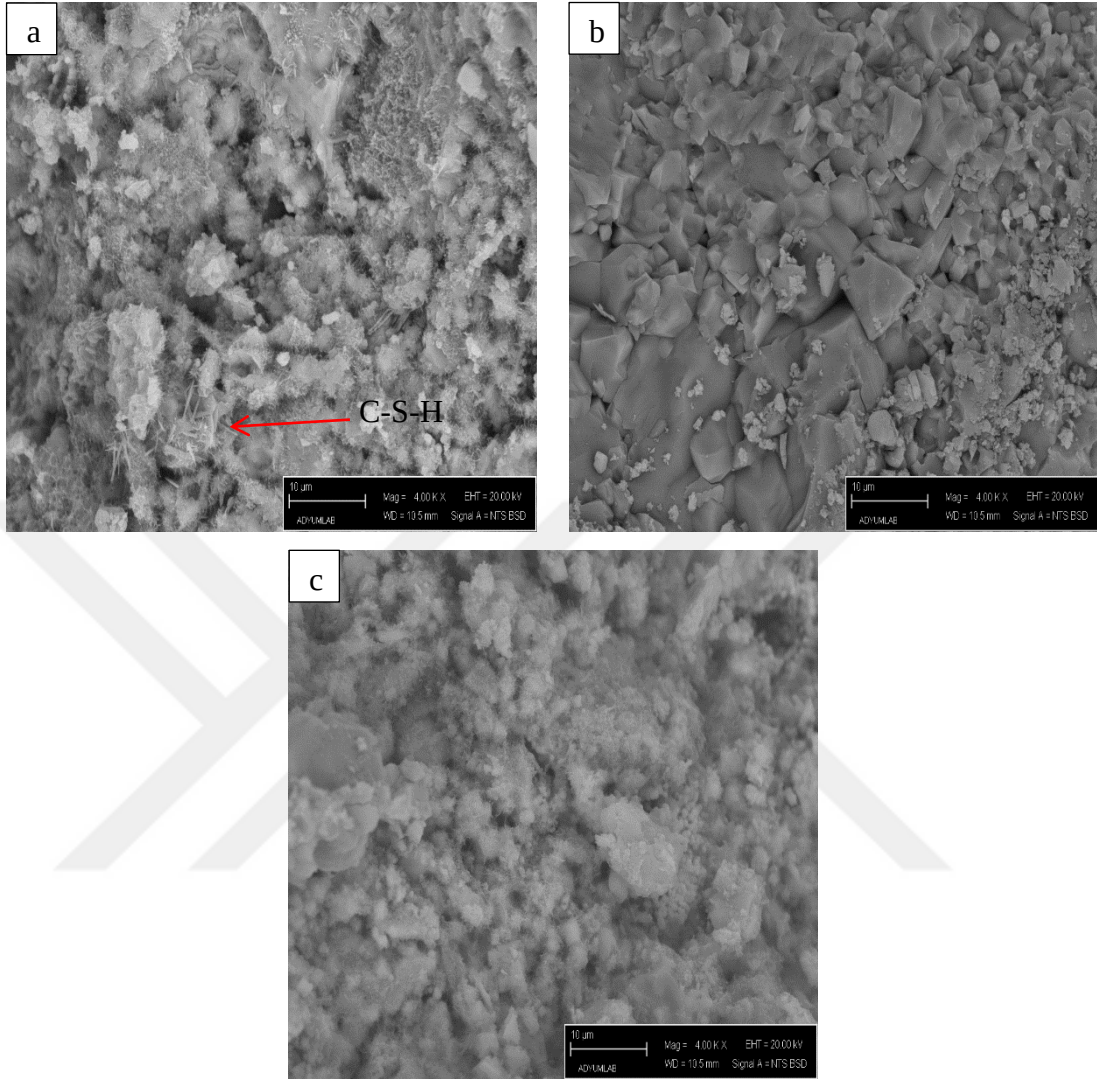
Uçucu kül katkılı 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.8’de verilmiştir.



Resim 7.8 Uçucu Kül Katkılı 4 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Uçucu kül katkılı 4 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde yoğun C-S-H jel yapısı içerisinde Xonotlit yapının oluşmaya başladığı ve derin kılcal çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir.

Yüksek fırın cürufu katkılı 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.9’da verilmiştir.



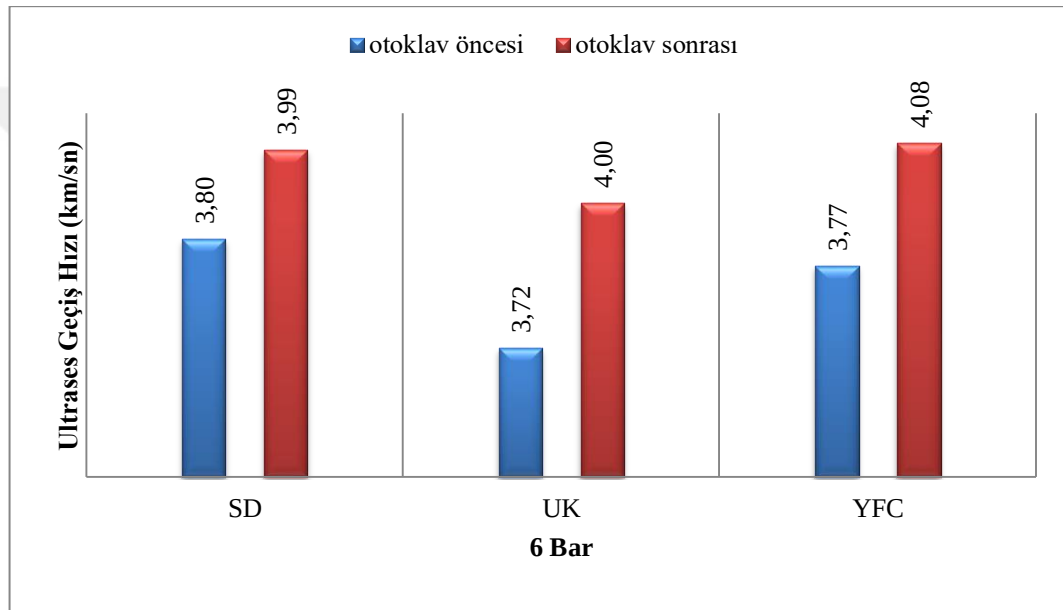
Resim 7.9 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı 4 Bar Basıncılı Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Yüksek fırın cürufu katkılı 4 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde sıcaklık ve buhar basıncının yükselmesiyle beraber üretilen serilerde portlandit yapı tespit edilmiştir. Resim 7.9b’de yüksek fırın cürufu katkılı serilerde C-S-H jel yapısının oluşumu görülmüştür. Resim 7.9c’de elde edilen mikro yapı verilerinde boşluklu yapının daha az oluştuğu görülmüştür.

7.4 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerden Elde Edilen Bulgular

7.4.1 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları

Mineral katkı ikameli betonların 6 bar buhar basınçlı otoklav kürü sonrasındaki ultrases geçiş hızına ilişkin bulgular Şekil 7.7’de verilmiştir.



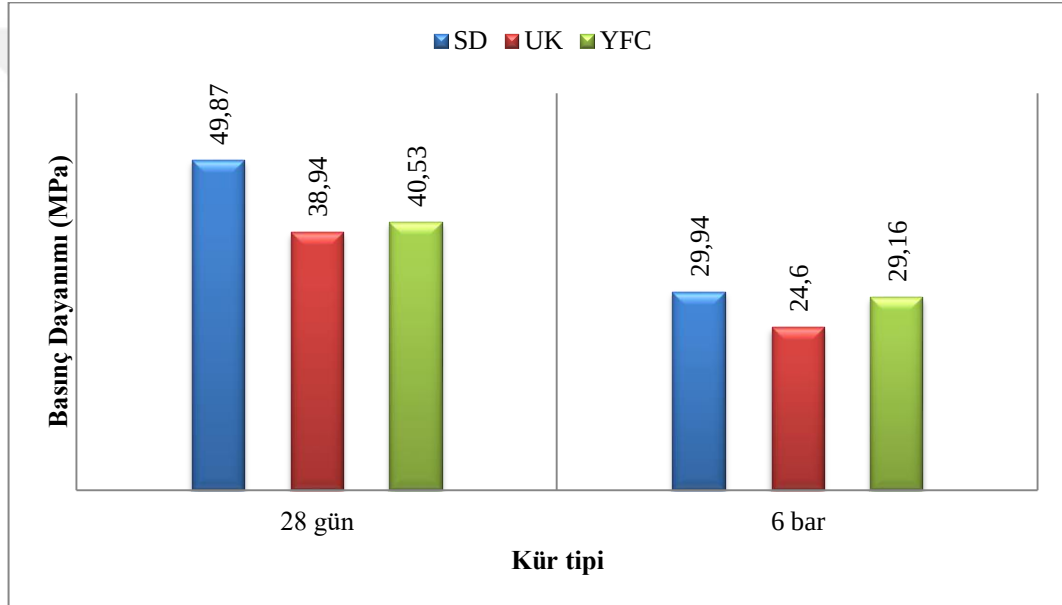
Şekil 7.7 6 Bar Buhar Basıncı Altında Üretilen Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

6 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan tüm serilerin ultrases geçiş hızında artış tespit edilmiştir. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu katkılı numunelerin ultrases geçiş hızı bulguları uçucu kül katkılı numunelere göre daha yüksek olup, bu değerler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise yakın değerlerde seyir ettiği görülmüştür. Silis dumanı katkılı örneklerin otoklav sonrasındaki geçiş hızı ortalaması 3.99 km/sn iken, yüksek fırın cürufu katkılı örneklerin otoklav sonrasındaki bu değeri ise 4.08 km/sn olarak bulunmuştur. Beton üretiminde kullanılan mineral katkı maddelerinin tane yapıları çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldurur ve çimento-agrega ara fazının kuvvetlenmesini sağlarlar. Ayrıca mineral katkılar hidrasyon reaksiyonlarıyla oluşan serbest kireç ile

puzolanik reaksiyona girerek kalsiyum silikatları meydana getirirler. Bu durum içyapıda daha tok bir yapının oluşmasını sağlar. Yapılan SEM incelemelerinde gözlenen bu ikincil reaksiyon ürünleri bahsedilen bu durumu destekler niteliktedir.

7.4.2 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Basınç Dayanımları

Mineral katkı ikameli betonların 6 bar buhar basınçlı otoklav kürü sonrasındaki basınç dayanımlarına ilişkin bulgular Şekil 7.8’de verilmiştir.

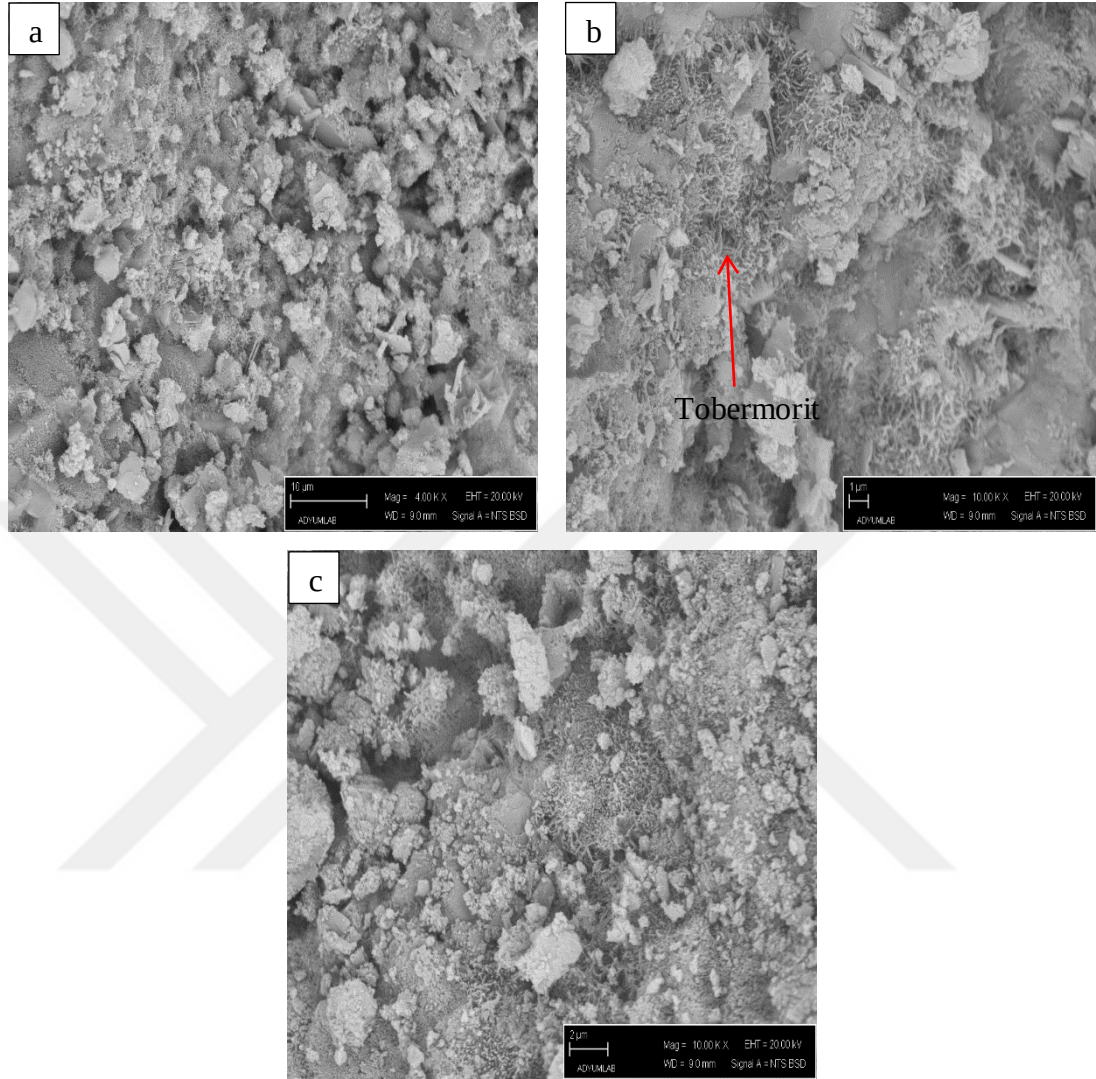


Şekil 7.8 6 Bar Basınçlı Buhar Kürü Uygulanan Örneklerin Basınç Dayanımları

Şekil 7.8’de 6 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan deney örneklerinin 28 günlük basınç dayanımına kıyasla azalış halinde olduğu görülmüştür. Azalış oranlarında en fazla düşüşü %39.96’lık oranla Silis Dumanı katkılı betonlar gösterirken uçucu kül katkılı betonlarda %36.82 ve Yüksek Fırın Cürufu katkılı betonlarda ise %27.97 ile bu azalışı takip etmiştir.

7.4.3 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları

Silis Dumanı katkılı 6 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.10’da verilmiştir.

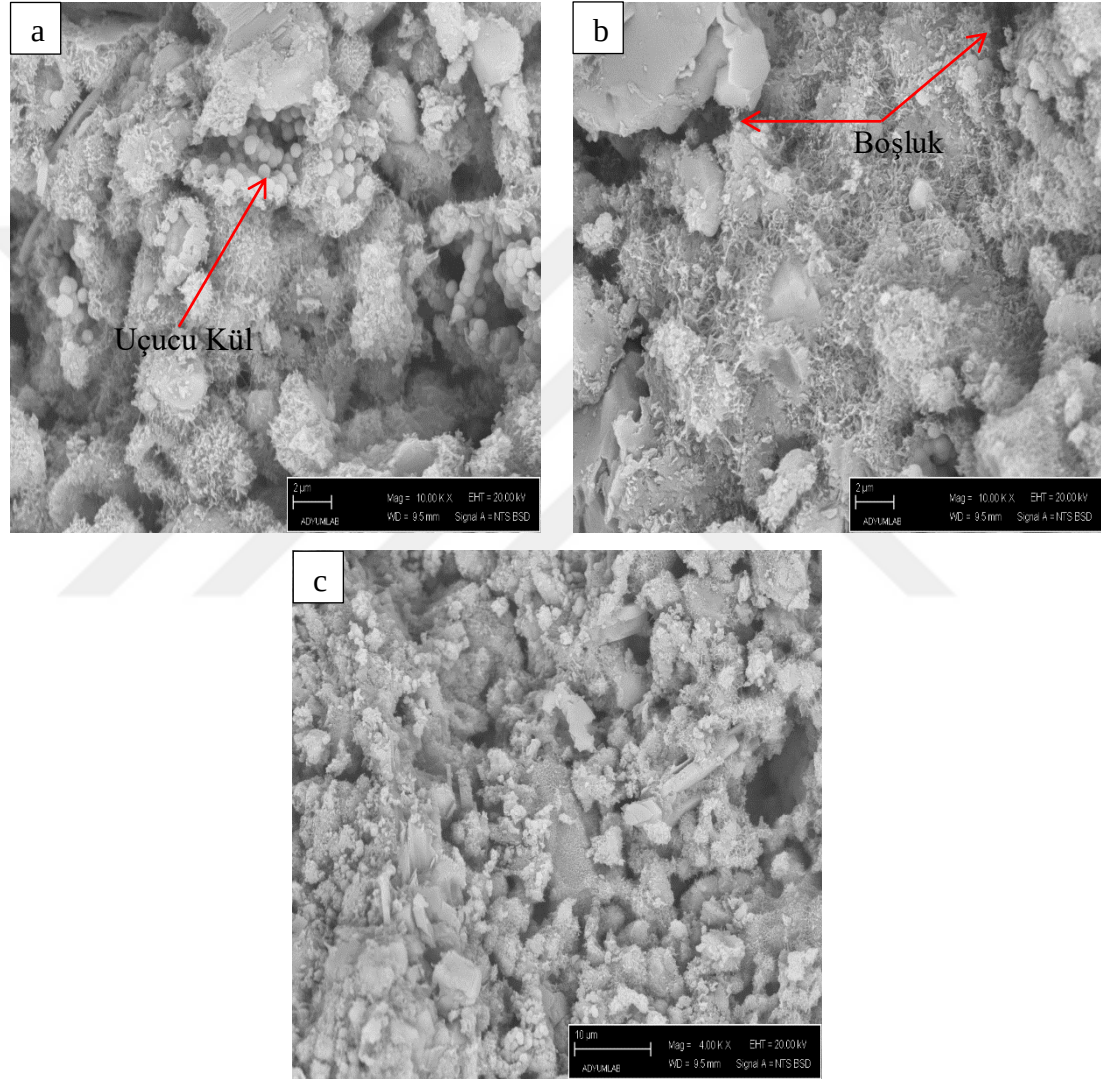


Resim 7.10 Silis Dumanı Katkılı ve 6 Bar Buhar Basıncı Uygulanmış Örnekte C-S-H Jel Yapısı ve Tobermorit Oluşumu

Silis Dumanı katkılı 6 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde C-S-H jel yapısının varlığı ile beraber tobermorit yapısının oluşmaya başladığı görülmüştür. Yapıda C-S-H jel yapısının oluştuğu görülmesine rağmen bu yapıyı temsil eden numunenin dayanım verilerinde düşüş ultrases geçiş hızı verilerinde ise artış gözlemlenmiştir. Bu değişimin silis dumanı taneciklerinin ilave C-S-H jel yapısının oluşumuyla boşlukları doldurmaya devam ettiği ancak oluşan yapının yüksek sıcaklık ve basınç ortamındaki gerilmelere, çimento taneciklerinin oluşturduğu C-S-H yapıdan daha az dayanıklı olduğu düşünülmektedir. Bu etkiyi yaratan durumun silis dumanı ve çimentonun fiziksel

özellikleri ve özellikle tanecik yapılarının birbirinden farklı olması durumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Uçucu kül katkılı 6 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.11’de verilmiştir.

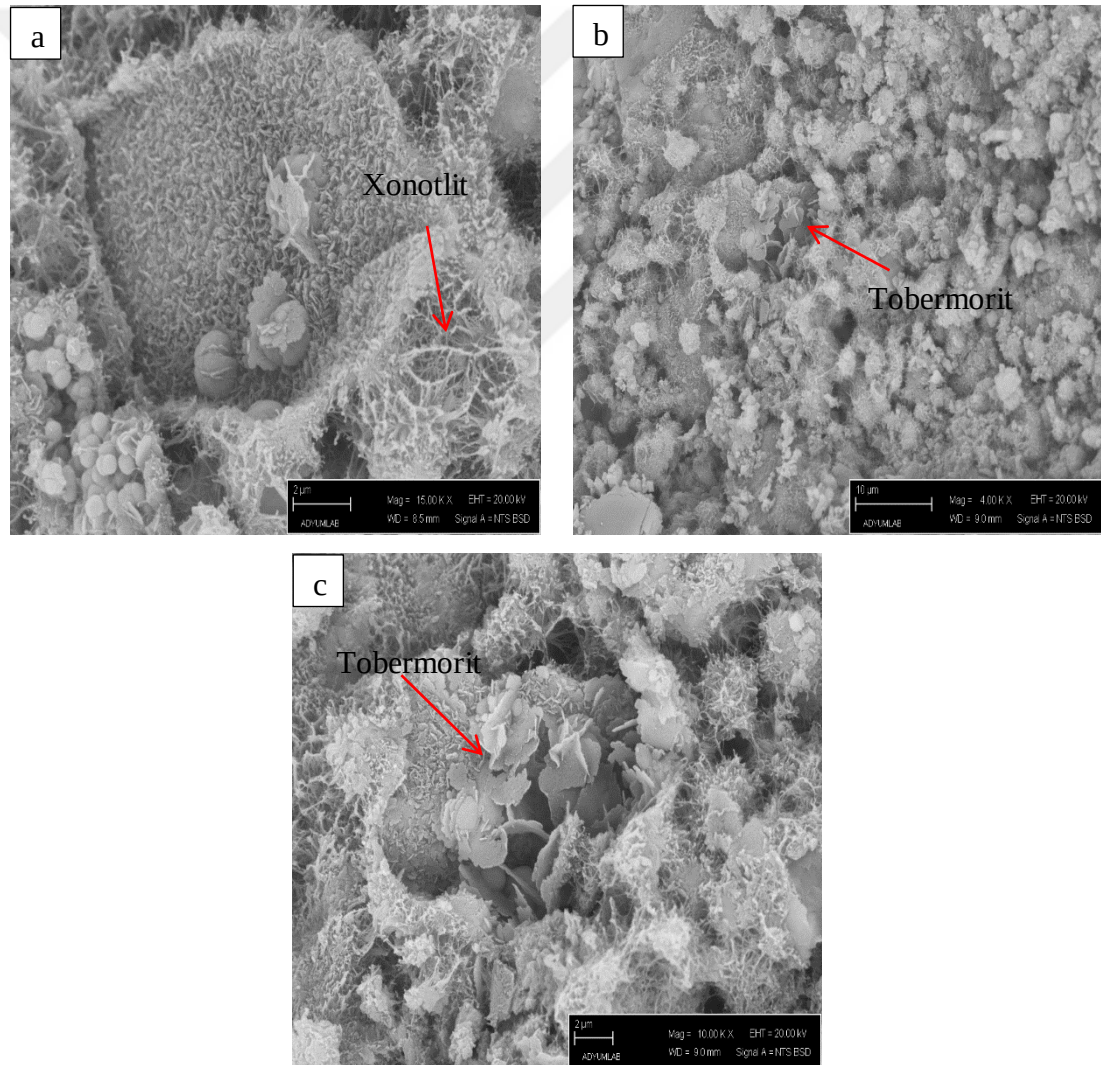


Resim 7.11 Uçucu Kül Katkılı 6 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri

Resim 7.11’de Uçucu kül ile üretilen 6 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde silis dumanı katkılı serilere kıyasla daha boşluklu bir yapı oluştuğu görülmektedir. Ayrıca boşluklu yapının yanı sıra içi dolu küresel yapıda kül taneciklerinin varlığı da görülmektedir.

SEM görüntüleri genel hatlarıyla değerlendirildiğinde kullanılan mineral katkıların fiziksel özelliklerinin puzolanik aktiviteyle doğrudan ilgisi olduğu düşünülmektedir. İnce taneli yapı, amorf kristal yapı, yüksek silis içeriğinin serbest kireç ile gerçekleşen ikincil reaksiyonlarının etkili olduğu ancak bu durumu kür ortamı ve rejiminin etkilediği de düşünülmektedir. Ultrases geçiş hızı ve dayanımındaki veriler bu durumu açıklayabilmektedir.

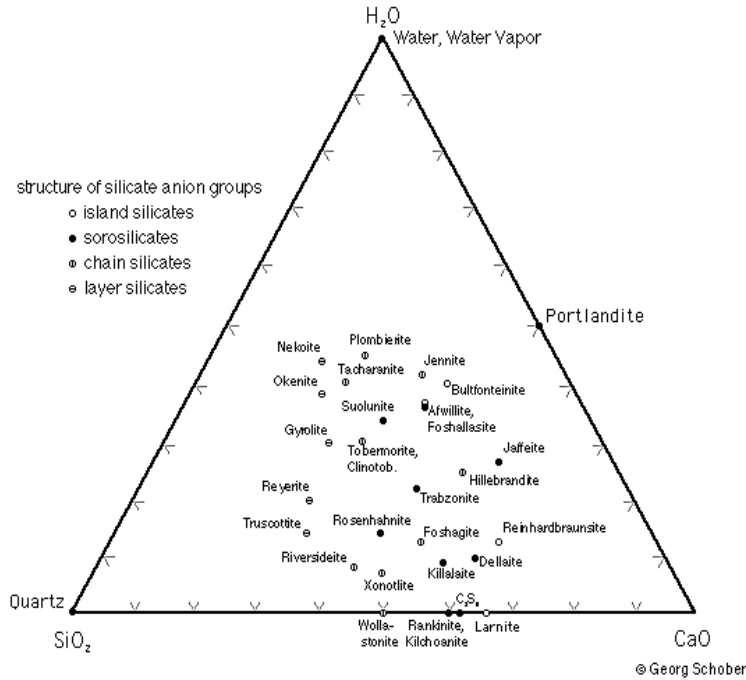
Yüksek fırın cürufu katkılı 6 bar basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin mikroyapı görüntüleri Resim 7.12’de verilmiştir.



Resim 7.12 Yüksek fırın cürufu katkılı ve 6 Bar Buhar Basıncı Uygulanmış Örnekte Tobermorit Oluşumu

Yüksek fırın cürufu katkılı 6 bar buhar basıncına tabi tutulan numunelerden elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde yüksek sıcaklık ve basınçta tobermorit yapının oluştuğu görülmüştür. Ancak elde edilen SEM görünümünde xonotlit yapısının varlığı da dikkat çekicidir. Uygulanan yüksek basınçlı buhar kürü ve sıcaklığın etkisi (6 bar buhar basıncı 165 °C sıcaklık) ve nem kaçışının engellenmesinden dolayı tobermorit yapının oluştuğu, yüksek sıcaklıklarda CaO/SiO₂ oranına bağlı olarak Xonotlit (Ca₆Si₆O₁₇(OH)₂) yapının oluştuğu tahmin edilmektedir. Ultrases geçiş hızı verilerinde artış görülmesi ancak hedeflenen dayanım verilerine çıkış sağlayamaması otoklav kürünün ilk zamanlarda fayda sağladığını ancak nihai dayanımda yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle düşüşe sebebiyet verdiği tahmin edilmektedir.

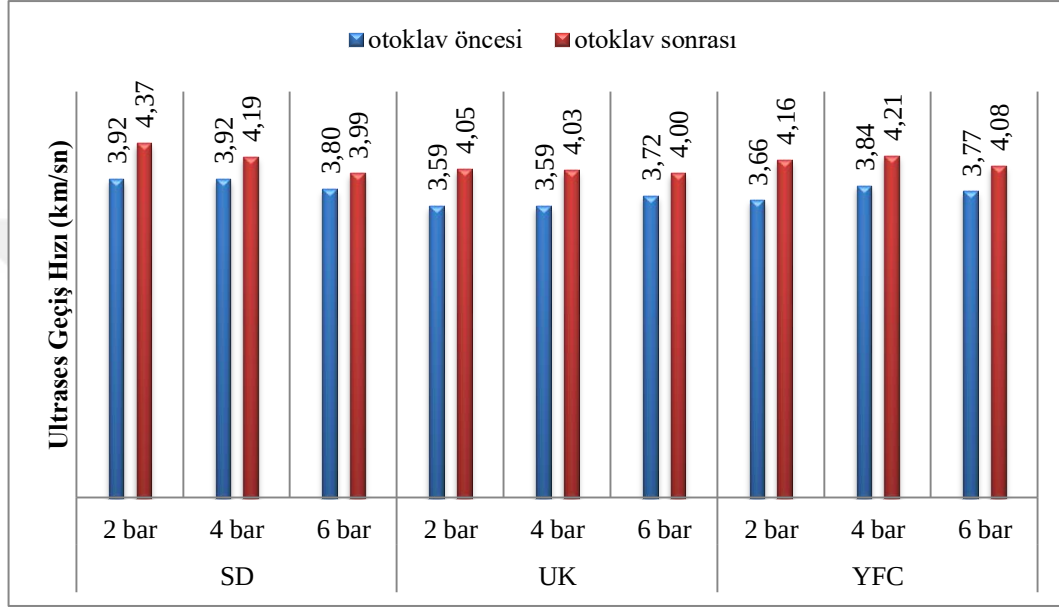
Resim 7.13’de verilen diyagram incelendiğinde örneklere uygulanan 8 saat süreli otoklav kürü işleminde başlıca tobermorit, etrengit, xonotlit, CSH ve diğer C-S-H kristal fazlarının gözlenmesi beklenmektedir. Mineral katkılı olarak üretilen ve farklı otoklav rejimlerine tabi tutulan örneklerin analiz edilen kristal yapıları bu diyagramla karşılaştırıldığında, benzer faz yapılarına rastlanıldığı gözlenmiştir [74].



Resim 7.13 Kristal C-S-H Fazları ve CaO-SiO₂-H₂O Sisteminde Gösterimi

7.5 Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Karşılaştırması

Şekil 7.9’da mineral katkılı deney örneklerinin otoklav kürü sonucunda elde edilmiş ultrases geçiş hızı bulguları verilmiştir.

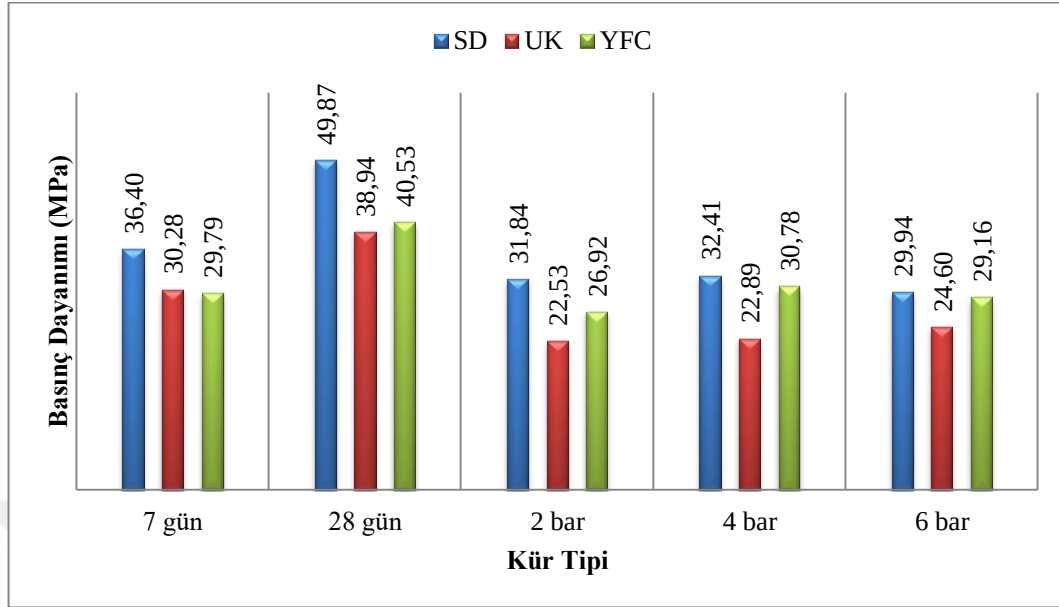


Şekil 7.9 Otoklav Kürü Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

Ultrases geçiş hızı deneyi otoklav öncesi ve otoklav sonrasında gerçekleştirilmiş olup, otoklav kürünün etkisiyle geçiş hızındaki değişim belirlenmiştir. Otoklav kürü sonrasında tüm serilerin ultrases geçiş hızında artış tespit edilmiştir. Ancak bu artışın otoklav rejimindeki sıcaklık ve basıncın artışı ile birlikte düşüşe geçtiği de tespit edilmiştir. Bu durumun yüksek sıcaklıkla birlikte buhar basıncına bağlı olarak iç bünyede, çimento yerine ikame edilen mineral katkının buhar basıncına karşı yeterli dayanımı gösterememesi sonucu gerçekleşebilecek kılcal çatlaklar sonucu oluşacak boşluklu yapıdan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

7.6 Basınçlı Buhar ve Standart Su Kürü Uygulanan Numunelerin Basınç Dayanımları Karşılaştırması

Mineral katkı ikameli betonların standart kür ve otoklav kürü sonrasındaki basınç dayanımlarına ilişkin bulgular Şekil 7.10’da verilmiştir.



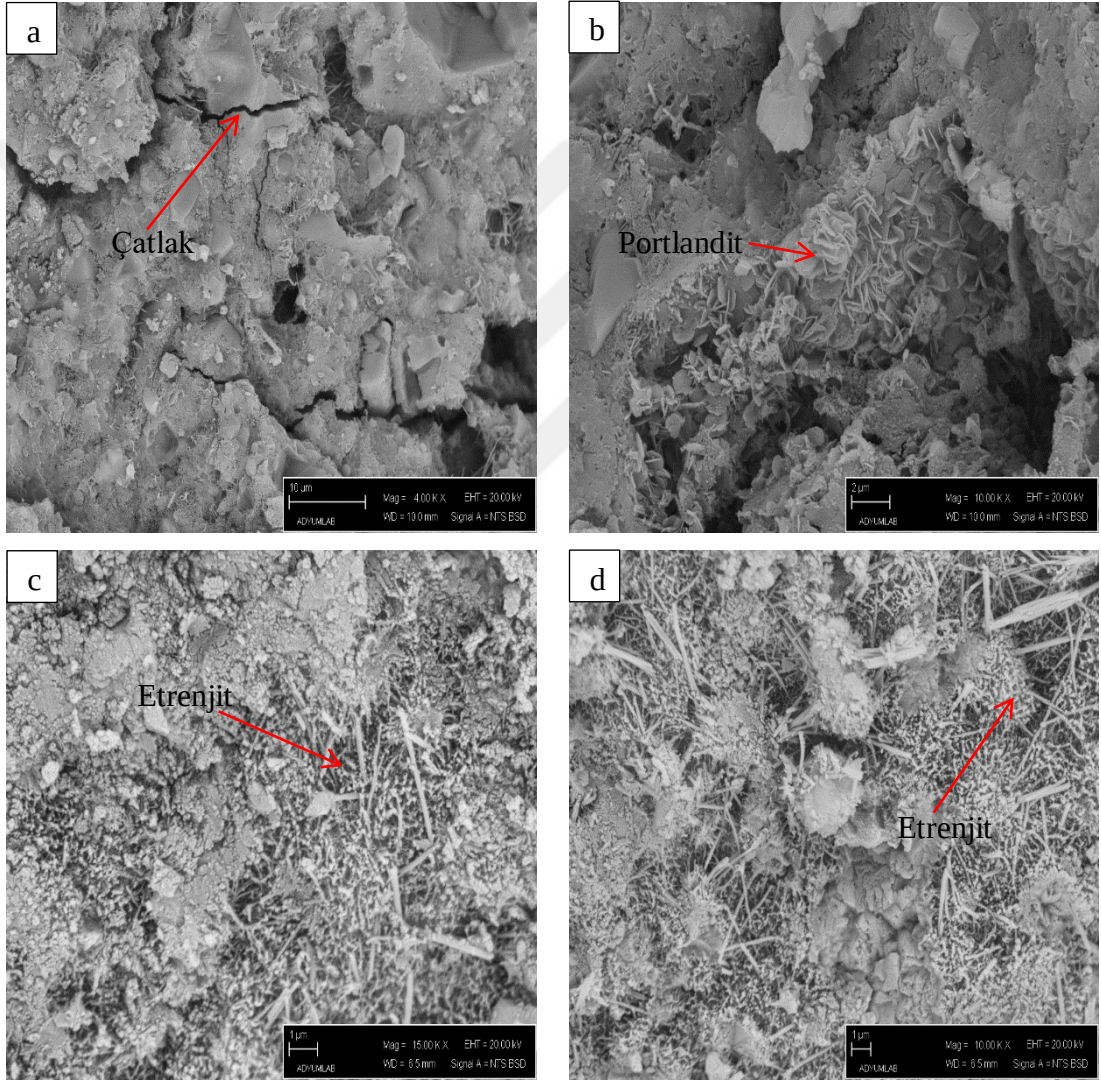
Şekil 7.10 Basınçlı Buhar ve Standart Su Kürü Uygulanan Örneklerin Basınç Dayanımı Karşılaştırması

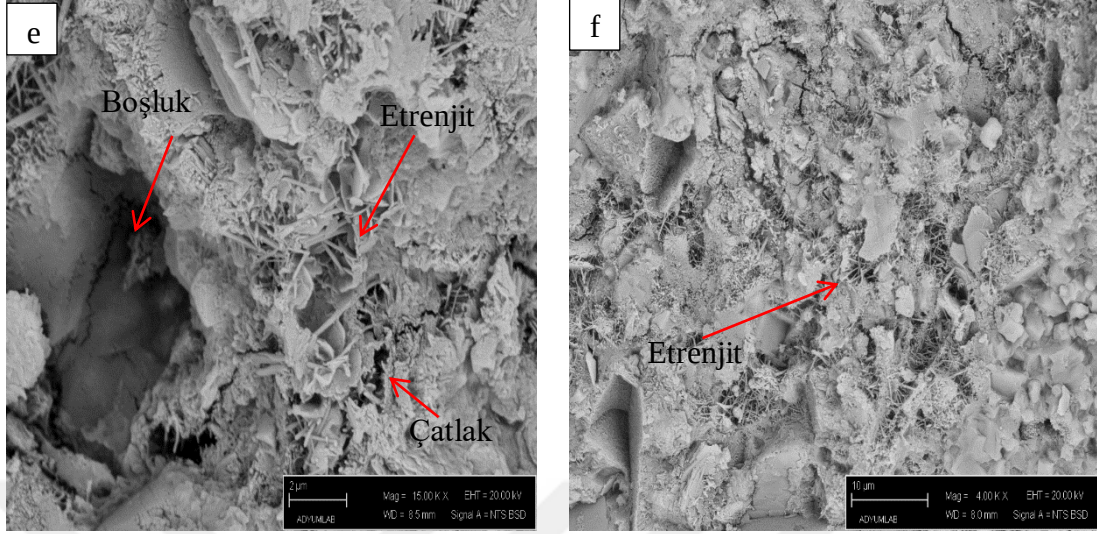
Farklı kür işlemleri sonucu elde edilen dayanım bulguları karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde standart kür işlemi görmüş numunelerde daha yüksek dayanım değerleri elde edildiği tespit edilmiştir. Basınçlı buhar kürüne tabi tutulan numunelerin 7 günlük standart su kürüne tabi tutulan numunelere yakın basınç dayanımı gösterdiği fakat 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre bunun pek mümkün olmadığı görülmüştür. Yüksek sıcaklık şartları altında çimento hidratasyonu ile oluşan Kalsiyum Hidroksit ile Silikat arasındaki bağ oluşumu devam etmektedir. Nitekim Otoklavlama olarak da adlandırılan basınçlı buhar küründe sıcaklık ve basıncın artışıyla nemin yeteri miktarda karşılanamamasına neden olmaktadır. Bu durumun çimento hamurunda oluşan C-S-H jellerinin amorf yapıdan kristal yapıya dönüşerek karasız hale gelmesine ve boşlukları dolduramayarak daha gözenekli bir yapı oluşmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucu olarak da betonun dayanımında düşme görülmektedir.

7.7 SEM Analizlerinde Tespit Edilen Hidratasyon Ürünleri

7.7.1 Mineral Katkılı Beton Numunelerin Mikroyapı Bulguları

Resim 7.14'te Mineral katkılı olarak üretilen standart su kürüne tabi tutulan deney örneklerinden elde edilen SEM analizi görüntüleri yardımıyla tespit edilen oluşumlar görülmektedir.

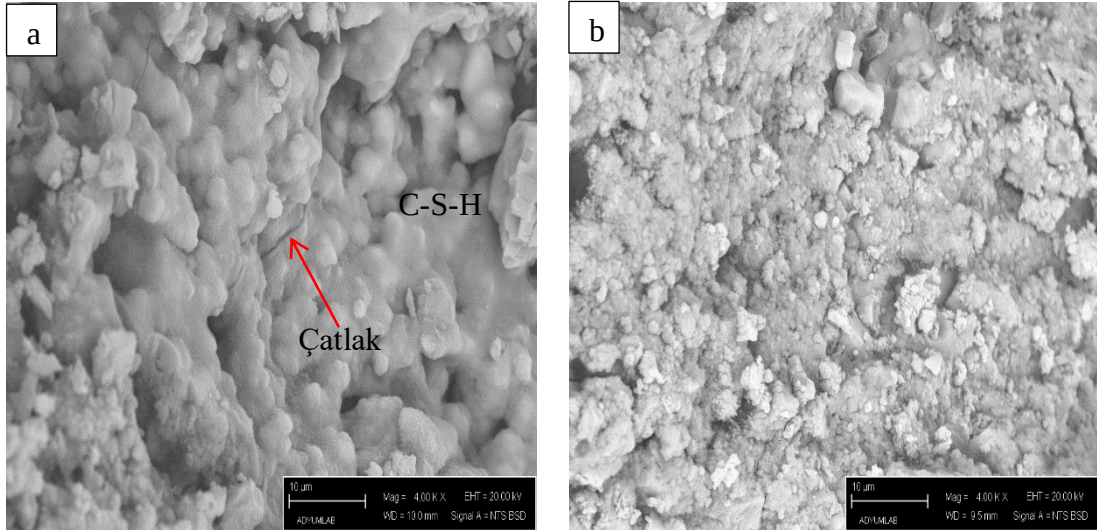


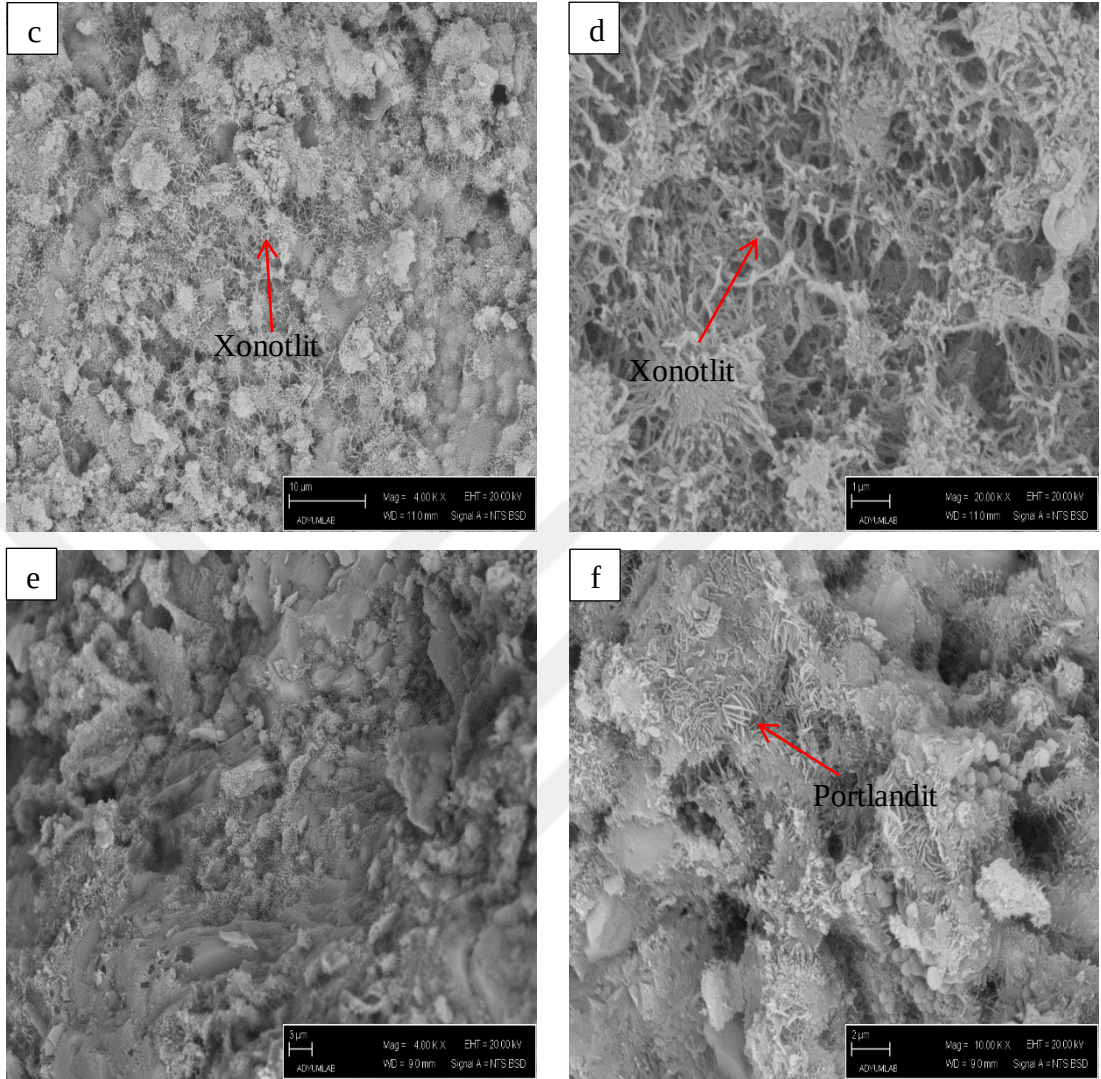


Resim 7.14 Mineral Katkılı Olarak Üretilen Standart Su Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri a) ve b) SD katkılı, c) ve d) UK Katkılı, e) ve f) YFC Katkılı numuneler

7.7.2 2 Bar Basınçlı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları

Mineral katkı ikameli olarak üretilen ve 2 bar basınçlı buhar kürü uygulanmasıyla elde edilen numunelerden alınan kesitlerden SEM analizi yardımıyla tespit edilen oluşumlar görülmektedir.

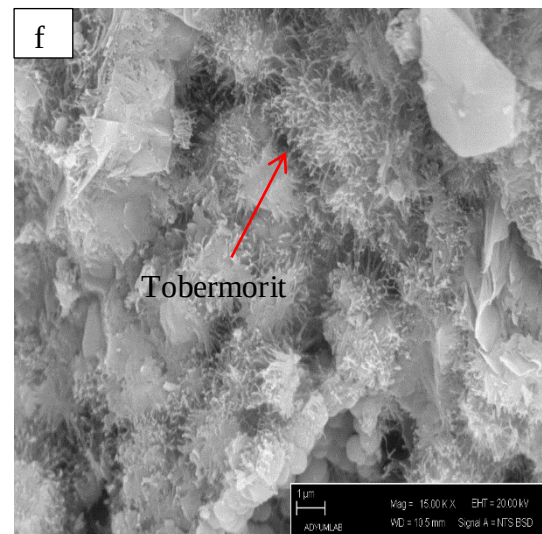
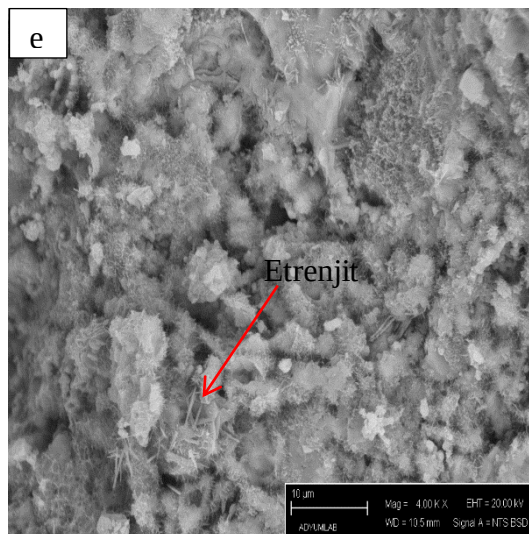
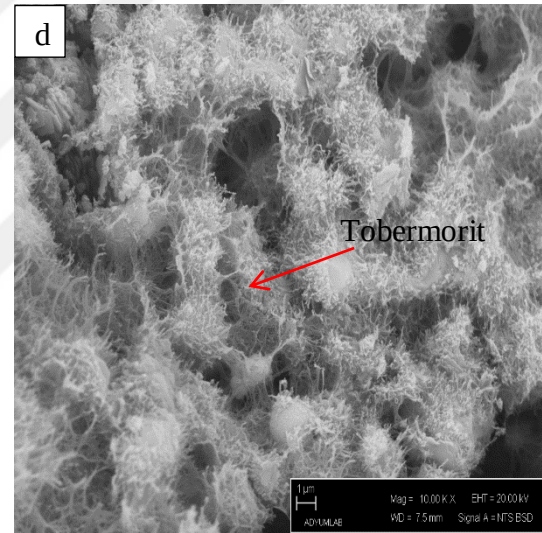
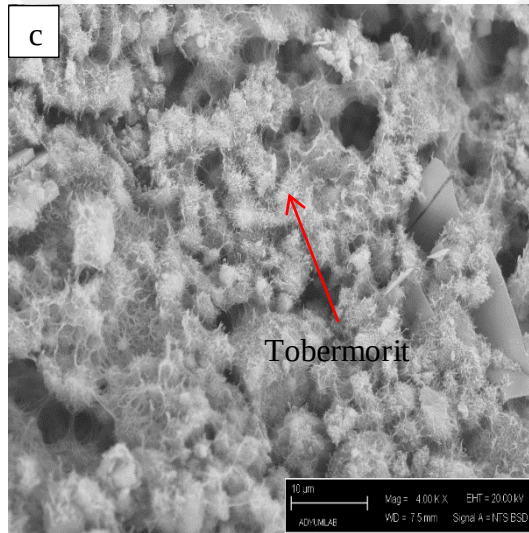
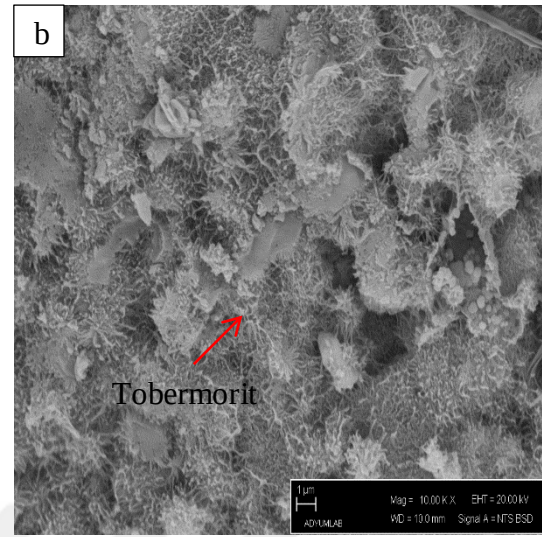
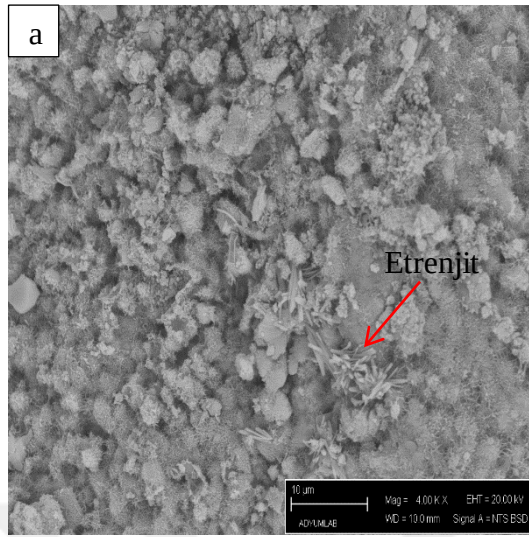




Resim 7.15 2 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlenen Numuneler a) ve b) SD Katkılı, c) ve d) UK Katkılı, e) ve f) YFC Katkılı Numuneler

7.7.3 4 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları

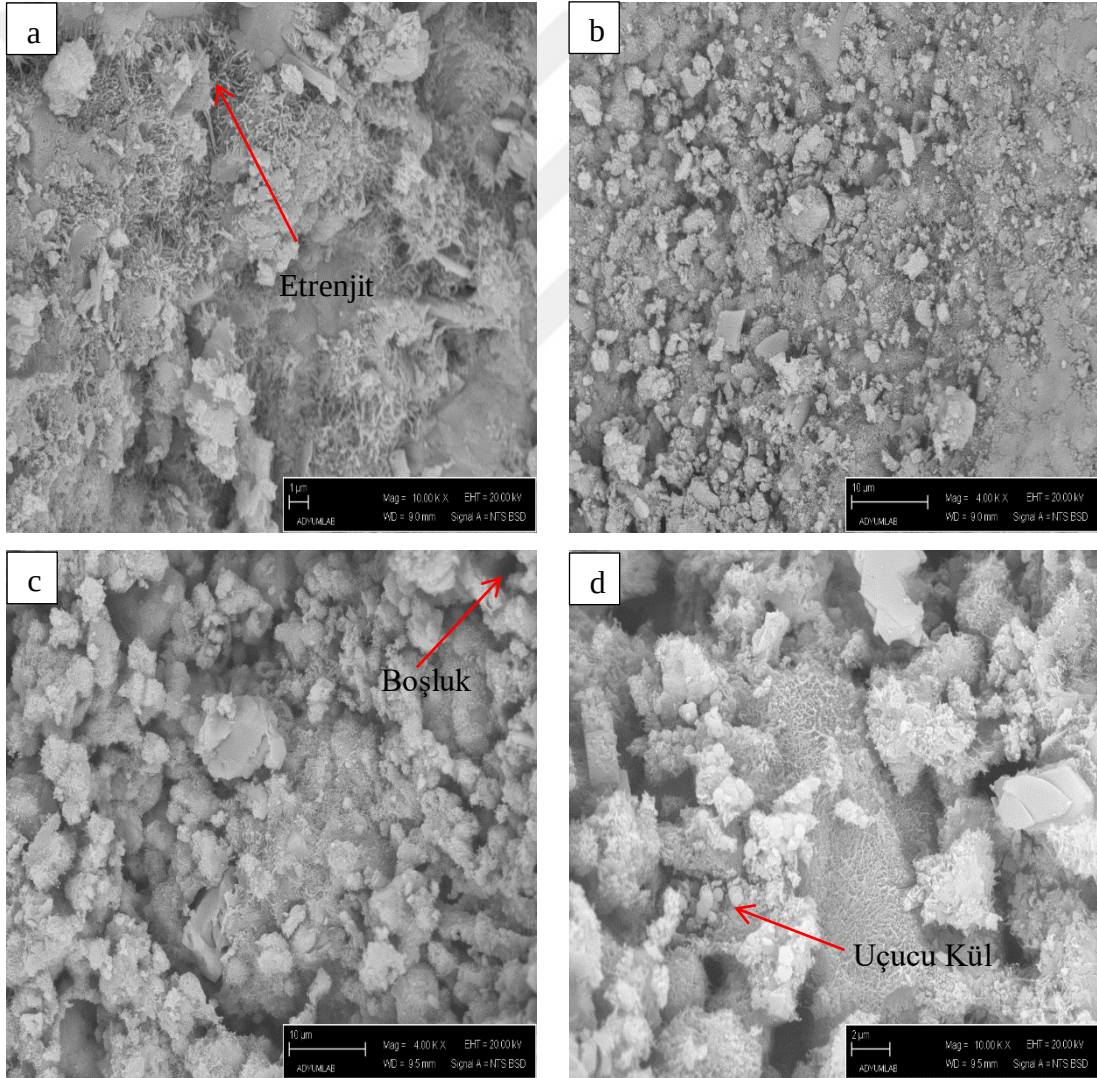
Mineral katkı ikameli olarak üretilen ve 4 bar basınçlı buhar kürü uygulanmasıyla elde edilen numunelerden alınan kesitlerden SEM analizi yardımıyla tespit edilen oluşumlar görülmektedir.

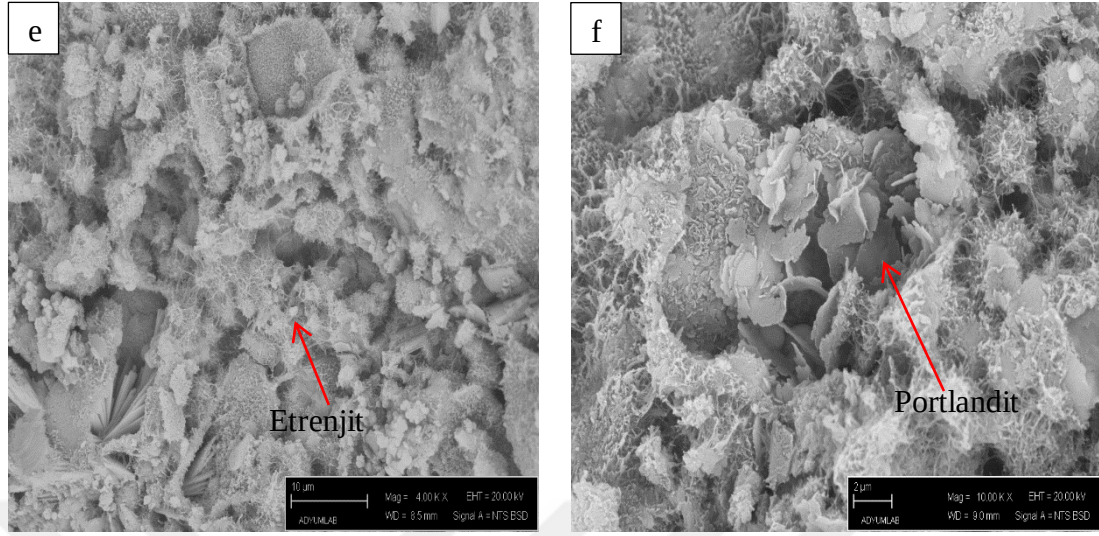


Resim 7.16 4 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlenen Numuneler a) ve b) SD Katkılı, c) ve d) UK Katkılı, e) ve f) YFC Katkılı Numuneler

7.7.4 6 Bar Basıncılı Buhar Kürüne Tabi Tutulan Numunelerin Mikroyapı Bulguları

Mineral katkı ikameli olarak üretilen ve 6 bar basınçlı buhar kürü uygulanmasıyla elde edilen numunelerden alınan kesitlerden SEM analizi yardımıyla tespit edilen oluşumlar görülmektedir.





Resim 7.17 6 Bar Buhar Basıncı Altında Kürlenen Numuneler a) ve b) SD Katkılı, c) ve d) UK Katkılı, e) ve f) YFC Katkılı Numuneler

8. SONUÇ ve ÖNERİLER**Sonuçlar;**

Mineral katkılı betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine otoklav kürü etkisinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır;

- Mineral katkı ikamesi ile birlikte standart kürü uygulaması yapılan deney örneklerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde artış tespit edilmiştir. Bu oran silis dumanı ikameli seride 7 günde %70.49, 28 günde %41.59, uçucu kül ikameli seride 7 günde %41.82, 28 günde %10.56, yüksek fırın cürufu ikameli seride 7 günde %39.53, 28 günde %15.07 olarak bulunmuştur.
- Otoklav kürü uygulanan serilerin basınç dayanım değerleri standart kür uygulaması yapılan deney örneklerinin basınç dayanım değerlerinden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Ayrıca kür rejiminin değişmesine bağlı olarak, sıcaklık ve buhar basıncının yükselmesiyle de basınç dayanım değerlerinde düşüş tespit edilmiştir.
- Otoklav kürü uygulanan numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinin standart kür uygulaması yapılan serilerin ultrases geçiş hızı değerlerinden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir.
- Elde edilen veriler ışığında basınçlı buhar kürüne tabi tutulan mineral katkılı betonların basınç dayanımı sonuçlarında en iyi değerleri 4 bar buhar basıncı 145 °C sıcaklık değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.

Beton numunelerinin SEM tekniğiyle mikro yapıları incelenmiş olup temel hidratasyon fazlarından C-S-H, CH yapıları gözlenmiştir.

Farklı basınç ve sıcaklıklar için:

- Silis Dumanı katkılı numuneler için: 2 bar buhar basıncı altında C-S-H jel yapısı içerisinde kılcal çatlakların olduğu görülmüştür. 4 bar buhar basıncı altında Tobermorit ve Xonotlit yapının oluşmaya başladığı ancak yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle çatlakların derinleştiği, 6 bar buhar basıncı

altında C-S-H jelinin varlığı ile beraber tobermorit yapısının oluşmaya başladığı gözlenmiştir.

- Uçucu Kül katkılı numuneler için: 2 ve 4 bar buhar basıncı altında C-S-H jel yapısı içerisinde Xonotlit yapısının oluşmaya başladığı ve 6 bar basınçlılarda boşluklu yapı ile uçucu kül taneciklerinin olduğu gözlenmiştir.
- YFC katkılı betonun farklı basınçlarında önceki katkılarda görülen yapılara ek olarak tobermorit ve portlandit oluşumunun daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 6 bar buhar basıncı altındaki yapılarda Xonotlit yapının varlığı dikkat çekicidir.

Buna göre; kullanılan mineral katkıların puzolanik özellikleri göz önüne alındığında Portlandit ile reaksiyona girerek oluşturdukları Tobermorit yapıları erken hidrasyon şartlarında, hidrasyon şartlarının sıcaklık ve basınçla geliştirilmeye çalışıldığı otoklav kürlü numunelere göre daha düşük seviyede kalmıştır. Bununla birlikte uçucu kül ve silis dumanı katkılı hazırlanan numuneler diğer mineral katkılı numunelere kıyasla, özellikle hidrasyonun erken safhalarında veya daha düşük sıcaklıkta kürlenmiş olanlar için çimento pastasının mikro yapısını yoğunlaştırdığı gözlemlenmiştir.

Öneriler;

- Mikro yapıların araştırıldığı çalışmalarda SEM analizi tekniğini destekleyecek analizlerin gerçekleştirilmesi mikro yapı sonuçları için daha nitelikli veriler elde etmemizi sağlar. Özellikle yapı malzemesi alanında bu yönde yapılacak çalışmalar malzeme bilimi açısından önem arz etmektedir.
- Mineral katkıların basınçlı buhar kürü sonrasında sağlayacağı faydaların araştırıldığı bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalar ile görülmüştür ki, ikili üçlü kombinasyonlarla oluşturulan mineral katkı ilavesinin tek bir katkı kullanımına kıyasla betonda dayanım ve dayanıklılığa daha fazla yarar sağlayacağı tahmin edilmektedir.

- Elde edilen sonuçlar ışığında, mineral katkıların %15 oranında çimento ile ikame edilmesiyle beton üretiminde doğrudan kullanılabileceği söylenebilir. Erken dayanım istenen durumlarda otoklav ile gerçekleştirilecek kürleme işleminde sıcaklık ve basınç değerlerine dikkat edilmesi, kür işlemi öncesinde ve sonrasında beton içyapısına etki edeceği düşünülen ısıtma ve soğutma sürelerinin 30dk'dan düşük tutulmaması önerilmektedir. Basıncılı buhar ile kürleme, mineral katkılı betonlarda erken dayanımı kazandırması açısından ideal bir kürleme yöntemi olduğu söylenebilir. Bu kür ile betonda oluşan hidratasyon oranını arttırabilir, Ca(OH)_2 içeriğini azaltabilir ve çimento pastasında bir iyileşme sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca otoklav küründeki farklı sıcaklık ve basınç değerlerinde gerçekleştirilecek deneysel çalışmaların faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] İ. B. Topçu and A. Uğurlu, “S 500/2000 Standardının Beton Açısından İncelenmesi,” in *ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, 2002, vol. 14, pp. 492–499.
- [2] M. Arslan, *Beton*, Birinci Ba. İstanbul: Atlas yayın dağıtım, 2001.
- [3] T. Y. Erdoğan, *Beton*, Beşinci Ba. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 2015.
- [4] U. Ersoy, *Betonarme İlkeleri Ve Taşıma Gücü Hesabı*. İstanbul: Evrim Kitabevi, 2001.
- [5] C. Liman, “Hidroklorik Asitin ve Nitrik Asitin Beton Dayanımına Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2006.
- [6] T. Ekmekyapar and İ. Örüng, *İnşaat Malzemesi Bilgisi*. Erzurum: Atatürk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, 1993.
- [7] T. Ekmekyapar and İ. Örüng, *İnşaat Malzeme Bilgisi*, Üçüncü Bas. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Yayınları, 1997.
- [8] B. Baradan, H. Yazıcı, and S. Aydın, *Beton*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015.
- [9] Y. Liu, “Accelerated curing of concrete with high volume Pozzolans-resistivity, diffusivity and compressive strength,” Doktora Tezi, Florida Atlantic University, 2012.
- [10] M. S. Akman, *Yapı Malzemeleri*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası, 1990.
- [11] T. Özturan, “Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği,” in 2. *Ulusal Beton Kongresi*, 1991, pp. 280–291.
- [12] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Fourth and. U.K: Longman Scientific and Technical, Longman Group, 1995.
- [13] TS 25, “Doğal Puzolan (Tras) - Çimento Ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gereklere Ve Uygunluk Kriterleri,” Ankara, Türkiye, 2008.
- [14] T. Tonak, F. Sipahi, and Y. Atay, “Al₂O₃ atıklarının Puzolanik Çimentoda Kullanımı,” *TÇMB, Çimento ve Bet. Dünyası*, vol. 28, pp. 38–48, 2000.

- [15] B. Postacıoğlu, *Beton (Bağlayıcı maddeler)*, Cilt I. İstanbul, Türkiye: Matbaa Teknisyenleri Basımevi, 1986.
- [16] Ş. Targan, “Kula Cürufu ve Bentonit ile Termik Santral ve Kolemanit Konsantratör Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi,” Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2001.
- [17] P. K. Mehta, *Natural pozzolans. in “Supplementary Cementing Materials for Concrete,”* VM Malhort. Ottawa: Canadian Government Publishing Center, 1987.
- [18] A. H. Memon, S. S. Radin, M. F. M. Zain, and J. F. Trottier, “Effects of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 32, no. 3, pp. 373–377, 2002.
- [19] O. B. Onat, “Türkiye’ de Üretilen Yüksek Fırın Cüruflarının Çimento Özelliklerine Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1998.
- [20] K. Tosun, “Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali-Silika –Reaksiyonuna Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2001.
- [21] H. Biricik, İ. Berktaş, F. Aköz, and N. Tulgar, A., “Buğday Sapı Külünün Pozolanik Özelliklerinin Araştırılması,” in 4. *Ulusal Beton Kongresi*, 1996.
- [22] “Çimentolar.” [Online]. Available: http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/44758/28885/yapı_malzemesi_-4-çimentolar.pdf. [Accessed: 16-Apr-2019].
- [23] E. Özdemir, “PÇ ve Mineral Katkı Maddelerinin İkili, Üçlü Ve Dörtlü Kombinasyonlarını İçeren Harç Numunelerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi,” Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi, 2006.
- [24] H. Yazıcı, “Yüksek hacimde c sınıfı uçucu kül içeren betonların mekanik özellikleri ve sülfürik asit dayanıklılığı,” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 11, no. 3, p. 443–448., 2005.
- [25] P. C. Hewlett and F. M. Lea, “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete,” *UK Elsevier Butterworth*, 1998.
- [26] A. C618-17, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” West Conshohocken PA, 2007.
- [27] T. E. 197-1, “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve

- Uygunluk Kriterleri,” Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
- [28] C. D. Atış, F. Özcan, O. Karahan, C. Bilim, U. K. Sevim, and A. Demir, “Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi,” *Türkiye Mühendislik Haberleri*, vol. 426, pp. 54–59, 2004.
- [29] B. Baradan, *Yapı Malzemesi II*. İzmir: İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2000.
- [30] M. Tokyay and K. Erdoğan, “Cürufklar ve cürufllu çimentolar,” TÇMB, Ankara, 2005.
- [31] M. Emiroğlu, Y. Koçak, and S. Subaşı, “Yüksek Fırın Cürufunun Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi,” in *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, 2011, pp. 113–117.
- [32] H. G. Smolczyk, “Slag structure and identification of slags,” in *7. International Congress Chemistry of Cement (ICCC)*, 1980, pp. 1–17.
- [33] T. Y. Erdoğan and T. K. Erdem, “Buhar Kürü Uygulamasında Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörlerden ‘Bekleme Süresi’ nin Önemi,” in *ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, 2002.
- [34] V. Alabaş, “Buhar Kürü Yönteminin Beton Basınç Dayanımına Etkisi,” Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, 2002.
- [35] S. Türkel and V. Alabas, “The effect of excessive steam curing on Portland composite cement concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 2, pp. 405–411, 2005.
- [36] A. Ş. Karabulut, “Reaktif pudra betonunun (RPB) özelliklerinin mineral katkılarla geliştirilmesi,” Yüksek lisans tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2006.
- [37] T. Uygunoğlu and O. Ünal, “Buhar Kürü Uygulanmış Pomzalı Hafif Betonun Özellikleri,” *Politek. Derg.*, vol. 10, no. 1, 2007.
- [38] İ. Demir, M. S. Başpınar, G. Görhan, and E. Kahraman, “SeyitÖmer Uçucu Külü Ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin Puzolanik Özelliklerinin Belirlenmesi,” *Yapı Teknol. Elektron. Derg.*, vol. 4, no. 1, pp. 39–46, 2008.
- [39] H. Binici, O. Aksoğan, H. Kaplan, B. Görür E., and N. Bodur, M., “Performance of ground blast furnace slag (gbs) and ground basaltic pumice (gbp) concrete against seawater attack,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp.

1515–1526.

- [40] T. Kotan, “Pasinler– Demirdöven pomzası ile üretilen hafif betonların mekanik özelliklerine atmosferik basınçlı buhar kürünün etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, 2009.
- [41] Türken H., “Katkısız ve katkılı betonlarda farklı kür malzemelerinin beton basınç dayanımına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, 2010.
- [42] Sharıfı Khıabanı Azar A., “Buhar kürünün uçucu küllü kendiliğinden yerleşen betonların donma-çözülme dayanıklılığına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2011.
- [43] Yenidünya E., “Çelik Tel Fiberli ve Kimyasal Katkılı Betonların Mekanik Dayanımlarına etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya., 2013.
- [44] O. Günaydın, K. Güçlüer, and A. Arin, “Mineral Katkılı Betonlarda Basınçlı Buhar Kürü Etkisinin Araştırılması,” *KSÜ Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 21, no. 1, pp. 92–99, 2017.
- [45] O. Günaydın, K. Güçlüer, and A. Arin, “Mineral Katkılı Betonlarda Basınçlı Buhar Kürü Etkisinin Araştırılması,” *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 21, no. 1, pp. 92–99, 2018.
- [46] Kılı A., “Kür şartlarının SIFCON’un mekanik özelliklerine etkisi,” Yüksek Lisans Tezi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, 2018.
- [47] K. Güçlüer and O. Günaydın, “Microstructures Investigation of Mineral Additive Concretes,” *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg.*, vol. 34, no. 1, pp. 83–90, 2019.
- [48] Z. Liu, L. Bu, Z. Wang, and G. Hu, “Durability and microstructure of steam cured and autoclaved PHC pipe piles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 679–689, 2019.
- [49] K. W. Meeks and N. J. Carino, “Curing of high-performance concrete,” Report of the state-of-the-art. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology., 1999.
- [50] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, *Concrete: Structures. Properties and Materials*, 2005.

- [51] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, “Concrete Microstructure,” in *Properties and materials*, vol. 3, University of California, 2006.
- [52] P. Tighare and M. R. C. Singh, “Study of Different Methods of Curing of Concrete & Curing Periods,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 5, 2017.
- [53] E. Öztekin, “Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Isıl İşlem Çevrimi ve Çimento Seçimi,” Ankara, Türkiye, 1980.
- [54] TS 3648, “Ön Yapımlı Beton Elemanlara Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Uygulama Kuralları,” Ankara, Türkiye, 1984.
- [55] A. Uğurlu, “Ön yapımlı Betonlarda Kür İşlemi,” *Bet. Prefabrikasyon*, vol. 45, pp. 20–27, 1998.
- [56] P. C. Taylor, S. H. Kosmatka, and G. F. Voigt, “Integrated materials and construction practices for concrete pavement: A state-of-the-practice manual,” Center for Transportation Research and Education Iowa State University, 2006.
- [57] T. Mutuk, “Nano Boyutta Toz Katkılı Çimentoların Fiziksel-Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi ,Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 2013.
- [58] H. N. Atahan, “Düşük Su/Çimento Oranlı Betonlarda Özelliklerin Çimento Hamurunun Boşluk Yapısına Duyarlılığı,” Doktora Tezi, İ.T.Ü., 2002.
- [59] I. G. Richardson, “The Nature Of The Hydration Products In Hardened Cement Paste,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, pp. 97–113, 2000.
- [60] J. Zhang, *Microstructure study of cementitious materials using resistivity measurement*. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2008.
- [61] Y. J. Cao, “Hydration and microstructure of cements containing silica fume or slag cured at different temperatures,” 1994.
- [62] B. Lothenbach, F. Winnefeld, C. Alder, E. Wieland, and P. Lunk, “Effect of Temperature on the Pore Solution, Microstructure and Hydration Products of Portland Cement Pastes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 483–491, 2007.
- [63] S. Azizi, “Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı,”

- Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007.
- [64] A. Değirmenci, “Silis dumanı katkısının betonarme çeliği korozyonuna etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2006.
- [65] V. S. Ramachandran, *Concrete Science, Concrete Admixtures Handbook*. William Andrew, 1996.
- [66] V. S. Ramachandran and J. J. Beaudoin, *Concrete Science’, Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology*. Canada: Noyes Publications, 2000.
- [67] J. Bensted and P. Barnes, “Structure and performance of cements,” London, 2002.
- [68] S. Mindess, Y. J.F., and D. Darwin, *Concrete (second edition)*. New York: Prentice Hall., 2002.
- [69] “TS EN 197–1, Çimentoların Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri,” Ankara, 2002.
- [70] TS EN 3530 933-1, “Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu,” Ankara, 1999.
- [71] TS 802, “Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları,” Ankara, 2009.
- [72] TS EN 12390-3, “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini,” Ankara, 2003.
- [73] ASTM C597, “Standart test method for pulse velocity through concrete,” West Conshohocken PA, 2009.
- [74] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Cemistry*, Springer E. 2014.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :ABUZER ARİN
 Doğum Yeri :ADIYAMAN
 Doğum Tarihi :04.03.1987
 Medeni Hali :BEKÂR
 Yabancı Dili :İNGİLİZCE
 E-posta : abuzerarin@gmail.com

Eğitim Durumu

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	YAPI MALZEMESİ	ADIYAMAN ÜNİVERSİTESİ	-
Lisans	İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ	BİTLİS EREN ÜNİVERSİTESİ	2014
Lise	SAYISAL	ADIYAMAN ATATÜRK LİSESİ	2004

Yayınlar

- [1] K. Güçlüer, O. Günaydın, A.Arin, "Mineral Katkılı Betonlarda Basınçlı Buhar Kürü Etkisinin Araştırılması", *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 21, Sayı 1
- [2] O. Günaydın, K. Güçlüer, A.Arin, " Mineral Katkı Maddeleri Üzerinde Basınçlı Buhar Kürü Etkisi İle Hidratasyon Ürünlerinin Değerlendirilmesi ", *Uluslararası Mühendislik Ve Teknoloji Sempozyumu*, Batman,2018.

- [3] A. Arin, E. Işık, A. Büyüksaraç, Y.L. Ekinci, " Şırnak İlının Olasılıksal Sismik Tehlike Analizi ", Şehr-i Nuh uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Şırnak,2018, Yayın No:4527162.
- [4] A. Arin, E. Işık, " Betonarme Yapılar İçin Risk Öncelik Belirlemesi Üzerine Örnek Bir Çalışma", Şehr-i Nuh uluslararası Multidisipliner Çalışmalar Kongresi, Şırnak,2018, Yayın No:4536222.

