

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİLİKA ESASLI KATKILARIN OTOKLAVLANMIŞ KÖPÜK
BETON MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Nuri İŞILDAR

**Danışman
Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN**

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2023**



© 2023 [Nuri IŞILDAR]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Önemi	2
1.2. Araştırma Kapsamı	3
1.3. Amaç ve Hedefler	4
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
2.1. Hafif Betonlar	6
2.1.1. Hafif beton türleri ve kullanım alanları.....	7
2.2. Köpük Beton	8
2.2.1. Köpük betonun özellikleri.....	9
2.2.1.1. Köpük betonun bileşenleri	9
2.2.1.2. Köpük betonun fiziksel özellikleri	11
2.2.1.3. Köpük betonun mekanik özellikleri	13
2.2.1.4. Köpük betonun fonksiyonel özellikleri.....	14
2.2.2. Köpük betonun üretimi	15
2.2.2.1. Köpük betonda kür koşulları.....	15
2.2.2.1. Köpük betonun avantajları ve dezavantajları.....	16
2.2.2.2. Köpük betonun kullanım alanları.....	17
2.3. Rötire.....	17
2.3.1. Rötire türleri	17
2.3.2. Rötreyi etkileyen faktörler	19
2.3.2.1. Harç bileşimi	20
2.4. Binalarda Isı Yalıtımı.....	22
2.4.1. Isı transferi mekanizmaları.....	22
2.4.2. Isı yalıtım malzemeleri.....	25
2.5. Çalışma Özetleri	26
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1. Hammaddeler.....	44
3.1.1. Kireç.....	44
3.1.2. Çimento	44
3.1.3. Mikronize kuvars	45
3.1.4. Uçucu kül	45
3.1.5. Metakaolin	45
3.1.6. Amorf silika	45
3.1.7. Su	46
3.1.8. Sentetik köpük ajanı.....	46
3.2. Hammadde Analizleri	47
3.2.1. Özkütle	47
3.2.2. Kimyasal analizler.....	47
3.2.3. Özgül yüzey alanı.....	48
3.3. Numune Üretim Süreci ve Karışım Oranları	50

3.3.1. Kür koşulları	54
3.3.1.1. Havada kür	54
3.3.1.2. Otoklavlama	54
3.4. Numune Analizleri.....	56
3.4.1. Eğilme ve basınç dayanımı	56
3.4.2. Ultrasonik ses hızı ve dinamik elastisite modülü.....	57
3.4.3. Kuruma büzülmesi	58
3.4.4. Isıl iletkenlik	59
3.4.5. Su buhar difüzyon direnci	60
3.4.6. Kuru birim hacim kütle	63
3.4.7. Kapiler su emme	64
3.4.8. Mikro-Yapısal özellikler	64
3.4.9. Hidratasyon ürünleri mineralojik özellikler	65
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	66
4.1. Hammadde Özellikleri	66
4.1.1. Özkütle	66
4.1.2. Özgül yüzey alanı.....	66
4.1.3. Kimyasal bileşenler.....	67
4.2. Otoklavlanmış ve Havada Kürleşmiş Köpük Betonların Özellikleri	68
4.2.1. Fiziksel özellikler	68
4.2.1.1. Kuru birim hacim kütle	68
4.2.1.1.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	68
4.2.1.1.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	69
4.2.1.2. Kuruma büzülmesi	70
4.2.1.3. Kapiler su emme	72
4.2.1.3.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	72
4.2.1.3.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	73
4.2.1.4. Su buhar difüzyon direnci	74
4.2.2. Mekanik özellikler	80
4.2.2.1. Eğilme ve basınç dayanımı	80
4.2.2.1.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	80
4.2.2.1.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	81
4.2.2.2. Ultrasonik ses hızı ve dinamik elastisite modülü.....	84
4.2.2.2.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	84
4.2.2.2.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	85
4.2.3. Termal özellikler	88
4.2.3.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	88
4.2.3.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	88
4.2.4. Yapısal ve mineralojik analizler	89
4.2.4.1. Yapısal özellikler	89
4.2.4.2. Hidratasyon ürünleri mineralojik özellikler	91
4.2.4.2.1. Otoklavlanmış ve havada kürleşmiş köpük betonlar	91
4.2.4.2.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar.....	92
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	96
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	114

ÖZET

Doktora Tezi

SİLİKA ESASLI KATKILARIN OTOKLAVLANMIŞ KÖPÜK BETON MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Nuri İŞILDAR

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN

Köpük beton üretiminde başta kuruma büzülmesi olmak üzere karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik iyileştirme çalışmaları devam etmektedir. Bu çalışmada öncelikle yüksek kuruma büzülmesinin önlenmesi ve ek olarak yangına direnci yüksek, ekonomik ve tamamen yerli kaynaklara ve teknolojiye dayalı bir otoklavlanmış köpük beton ısı yalıtım malzemesi geliştirilmesi hedeflenmiştir. İlk aşamada farklı yoğunluklar (300, 400 ve 500 kg/m³) ve kürleme şartlarında (havada ve otoklav) hazırlanan köpük betonların, kuruma büzülmesi, ısı iletkenliği ve mekanik özellikleri dikkate alınarak yalıtım malzemesi standartlarını karşılama durumu araştırılmıştır. Bu aşamada 300 kg/m³ yoğunluğa sahip köpük betonun hedeflenen özellikleri sağladığı belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise söz konusu yoğunluğa sahip otoklavlanmış köpük beton kontrol olarak değerlendirilmiş ve mekanik özellikler üzerinde etkili C-S-H bağ oluşumunu geliştirmek üzere yüksek incelikte silika esaslı farklı mineral katkıları (F sınıfı uçucu kül, amorf silika ve metakaolin) basit ikame yöntemine göre çimento ile farklı oranlarda (% 5, 10 ve 15) yer değiştirilerek kullanılmıştır. Bu kapsamda kuru yoğunluk, kapiler su emme katsayısı, basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik ses hızı ve dinamik elastisite modülü, ısı iletkenliği, hidrasyon ürünlerinin mineralojik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Havada kürlenmiş köpük beton için % 0.23 olan kuruma büzülmesi, otoklavlama etkisiyle % 0.03'e düşmüştür. Otoklavlama kapiler su emme katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü değerlerinde de iyileşme sağlamıştır. Mineral katkıları içerisinde en düşük kapiler su emme katsayısı, %5 oranındaki uçucu kül kullanımıyla sağlanmıştır. Otoklavlama işlemi, köpük betonlarda basınç ve eğilme dayanımlarını artırmıştır. En yüksek dinamik Elastisite modülü ve ultrasonik ses hızı değerleri (0.62 GPa ve 1.40 km/s) % 5 metakaolin katkılı ve en düşük ısı iletkenlik katsayısı ise % 5 uçucu kül katkılı otoklavlanmış köpük betonlarda bulunmuştur. SEM görüntüleri ve XRD analizlerinde, yapısal, mineralojik ve mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir. Sonuç olarak, başta mekanik özellikleri olmak üzere, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri çarpıcı bir şekilde iyileştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, otoklavlanma, mineral katkı, fiziksel ve mekanik özellikler, termal özellikler.

2023, 114 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF SILICA-BASED ADDITIVES ON ENGINEERING PROPERTIES OF AUTOCLAVED FOAM CONCRETE

Nuri İŞILDAR

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN

Improvement studies continue to solve the problems encountered in foam concrete production, especially drying shrinkage. In this study, it is aimed primarily to prevent high drying shrinkage and additionally to develop an autoclaved foam concrete thermal insulation material with high fire resistance, economic and completely based on domestic resources and technology. At the first stage, it was investigated whether the foam concretes prepared in different densities (300, 400 and 500 kg/m³) and curing conditions (air and autoclave) meet the insulation material standards on the basis of drying shrinkage, thermal conductivity and mechanical properties. At this stage, it was determined that the foam concrete with a density of 300 kg/m³ provided the targeted properties. In the next stage, autoclaved foam concrete with the said density was evaluated as control and high-fine silica-based different mineral additives (F class fly ash, amorphous silica and metakaolin) were mixed with cement in different proportions (5, 10 and 15%) were used interchangeably. In this context, dry density, capillary water absorption coefficient, compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity and dynamic modulus of elasticity, thermal conductivity, changes in mineralogical properties of hydration products were investigated. Drying shrinkage, which was 0.23% for air-cured foam concrete, decreased to 0.03% with the effect of autoclaving. Autoclaving also improved the capillary water absorption coefficient and water vapor diffusion resistance factor values. The lowest capillary water absorption coefficient among mineral additives was achieved with the use of 5% fly ash. Autoclaving increased the compressive and flexural strengths of foam concrete. The highest dynamic modulus of elasticity and ultrasonic pulse velocity (0.62 GPa and 1.40 km/s) were found in autoclaved foam concrete with 5% metakaolin additive and the lowest thermal conductivity coefficient with 5% fly ash additive. Changes in structural, mineralogical and mechanical properties were investigated in SEM images and XRD analyses. As a result, it has been determined that the physical, mechanical and thermal properties, especially the mechanical properties, have improved dramatically.

Keywords: Foam concrete, autoclaving, mineral admixture, physical and mechanical properties, thermal properties.

2023, 114 pages

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını FDK-2020-8130 numaralı BAP projesi ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu araştırmada bilgi ve tecrübesi ile beni destekleyen değerli Danışman Hocam Prof. Dr. Şemsettin KILIÇARSLAN'a teşekkürlerimi sunarım. Araştırma ve deneysel çalışmalar kapsamında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Metin DAVRAZ'a, teşekkür ederim.

Araştırmamda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Murat KORU ve Doktor Öğretim Üyesi Ali Ekrem AKDAĞ'a teşekkür ederim.

Yapılan üretim ve deney çalışmalarında her türlü desteği esirgemeyen SDÜ Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi ve çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında beni destekleyen ve yalnız bırakmayan eşim ve aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Nuri İŞILDAR
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Hücresel beton türleri.....	8
Şekil 2.2. Ön köpürtme yöntemli köpük beton harcı hazırlanışı.....	16
Şekil 2.3. Otojen ve kimyasal rötre.....	18
Şekil 3.1. Laboratuvar tipi bilyalı değirmen (SDÜ-DEYMAM).....	46
Şekil 3.2. Sentetik köpük ajanı (Lightcon 28).....	46
Şekil 3.3. Helyum Piknometresi (SDÜ-DEYMAM).....	47
Şekil 3.4. Blaine test cihazı (SDÜ-DEYMAM).....	48
Şekil 3.5. Köpük jeneratörü ve karışım.....	51
Şekil 3.6. Kesme Cihazı (SDÜ-DEYMAM).....	52
Şekil 3.7. Etüv cihazında kurutulan numuneler.....	52
Şekil 3.8. Köpük beton deney numuneleri.....	53
Şekil 3.9. Nem ve sıcaklık ayarlanabilen iklim kabini.....	54
Şekil 3.10. Kürleme işlemi için kullanılan otoklav cihazı (SDÜ-DEYMAM).....	55
Şekil 3.11. Otoklav cihazının süreye bağlı sıcaklık ve basınç rejimi.....	55
Şekil 3.12. Otoklavlanmış köpük beton numunelerinin eğilme ve basınç dayanımı deneyleri.....	57
Şekil 3.13. Ultrasonik ses hızı cihazı ve numune ölçümleri.....	58
Şekil 3.14. Rötre numuneleri ve ölçümler.....	59
Şekil 3.15. Laser Comp Fox 50 Isı iletkenlik test cihazı (SDÜ-DEYMAM).....	60
Şekil 3.16. Nem ve sıcaklık ayarlanabilen iklim kabininde su buharı difüzyon numuneleri.....	61
Şekil 3.17. Kapiler su emme testi.....	64
Şekil 3.18. SEM Cihazı (SDÜ-YETEM).....	65
Şekil 3.19. X-Işını difraksiyon cihazı (XRD, SDÜ-YETEM).....	65
Şekil 4.1. FC ve AFC serilerinde 180 gün süre ile incelenen kuruma büzülmesi değişimi.....	71
Şekil 4.2. FC ve AFC serilerinde 180 gün süre ile incelenen kütle kaybı değişimi... 71	
Şekil 4.3. FC ve AFC serileri kapiler su emme katsayıları.....	72
Şekil 4.4. Mineral katkılı AFC300 serisi kapiler su emme katsayılar.....	73
Şekil 4.5. Havada kürlenmiş köpük beton numunelerinin su buharı akış hızları.....	77
Şekil 4.6. Otoklavlanmış köpük beton numunelerinin su buharı akış hızları.....	77
Şekil 4.7. FC-AFC serileri için su buharı difüzyon direnç faktörleri.....	79
Şekil 4.8. FC ve AFC serileri için basınç dayanımları.....	80
Şekil 4.9. FC ve AFC serileri eğilme dayanımları.....	81
Şekil 4.10. AFC300 mineral katkılı köpük beton serilerinin basınç dayanımları.....	81
Şekil 4.11. AFC300 mineral katkılı köpük beton serilerinin eğilme dayanımları.....	82
Şekil 4.12. Basınç-eğilme dayanımı ilişkisi.....	83
Şekil 4.13. FC ve AFC serileri için ultrasonik ses geçiş hızları.....	84
Şekil 4.14. FC ve AFC serileri için dinamik elastisite modülleri.....	84
Şekil 4.15. Ultrasonik ses hızı-basınç dayanımı ilişkisi.....	86
Şekil 4.16. Dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi.....	87
Şekil 4.17. FC ve AFC serileri için ısı iletkenlik katsayıları.....	88
Şekil 4.18. Otoklavlanmış mineral katkılı AFC300 serileri ısı iletkenlik katsayıları.....	89
Şekil 4.19. FC Serisi havada kürlenmiş köpük beton SEM görüntüleri (x100).....	90
Şekil 4.20. AFC Serisi otoklavlanmış köpük beton SEM görüntüleri (x 100).....	90
Şekil 4.21. FC ve AFC numunelerinin mikroyapı görüntüleri (x 10.000).....	90
Şekil 4.22. FC300 köpük beton XRD analiz verileri.....	91

Şekil 4.23. AFC300 köpük beton XRD analiz verileri	91
Şekil 4.24. AFCFA-5 köpük beton XRD analiz verileri.....	93
Şekil 4.25. AFCFA-10 köpük beton XRD analiz verileri.....	93
Şekil 4.26. AFCFA-15 köpük beton XRD analiz verileri.....	93
Şekil 4.27. AFCAS-5 köpük beton XRD analiz verileri.....	94
Şekil 4.28. AFCAS-10 köpük beton XRD analiz verileri.....	94
Şekil 4.29. AFCAS-15 köpük beton XRD analiz verileri.....	94
Şekil 4.30. AFCMK-5 köpük beton XRD analiz verileri.....	95
Şekil 4.31. AFCMK-10 köpük beton XRD analiz verileri	95
Şekil 4.32. AFCMK-15 köpük beton XRD analiz verileri	95



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Çimsa Portland çimentosu özellikleri	44
Çizelge 3.2. Sabit su-katı oranında ve farklı köpük kullanım seviyelerinde (1 m ³) harç karışımının bileşenleri.....	51
Çizelge 3.3. Sabit su/katı oranında, farklı oranlarda uçucu kül, metakaolin ve amorf silika içeren harç bileşenleri (1 m ³).....	53
Çizelge 4.1. Hammadde ve mineral katkıların özkütle bulguları.....	66
Çizelge 4.2. Hammadde ve mineral katkıların özgül yüzey alanı değerleri	67
Çizelge 4.3. Kullanılan hammaddelerin kimyasal özellikleri	68
Çizelge 4.4. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş farklı kuru yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve yoğunlukları	68
Çizelge 4.5. Otoklavlanmış ve aynı teorik yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve kuru yoğunlukları.....	69
Çizelge 4.6. FC300 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	74
Çizelge 4.7. FC400 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	75
Çizelge 4.8. FC500 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	75
Çizelge 4.9. AFC300 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	75
Çizelge 4.10. AFC400 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	76
Çizelge 4.11. AFC500 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)	76
Çizelge 4.12. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş numunelerin alan, su buharı akımı, doygunluk basınç farkları ve deney hücresindeki basınç değerleri verileri.....	78
Çizelge 4.13. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri için su buhar difüzyonu verileri	79

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
Bar	bar
c	kapiler su emme katsayısı
CEN	Avrupa standardizasyon komitesi
cm	Santimetre
cm ² /g	Santimetre/gram
d/dk	devir/dakika
DIN	Alman standardı
dm ³	Desimetrekül
E _d	Dinamik Elastisite modülü
EPS	Genleştirilmiş polistiren
G	Su buharı akış hızı
GPa	Gigapaskal
h.Pa	hektopascal
ISO	Uluslararası standart organizasyonu
J/mg.K	Joule/miligram-kelvin
k	Isı iletim katsayısı
kg/m ³	Kilogram/metrekül
km/s	Kilometre/saat
L	Litre
lbs	Libre
m/sa	Metre/saat
m ² .h.Pa	metrekare hektopascal
m ³	Metrekül
mg/h	miligram/saat
mm ²	Milimetrekare
MPa	Megapaskal
N	Newton
N/mm ²	Newton/milimetrekare
N/s	Newton/saniye
Pa	Pascal
pH	Potansiyel hidrojen
S _d	Su buharı geçişinde deney numunesinin eşdeğer kalınlığı
SDÜ DEYMAM	Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma ve Uygulama Merkezi
SDÜ YETEM	Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
T	Sıcaklık
t	Süre
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normları
W/mK	Watt/metre-kelvin
XPS	Ektrude Polistiren
XRD	X Işınları Difraktometresi
ρ	Deney numunesinin yoğunluğu

λ	Isı iletkenlik katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Sıcaklık birimi (Celcius)
ΔT	Sıcaklık farkı
μm	Mikrometre



1. GİRİŞ

Günümüzde hala en önemli yapı malzemelerinden olan beton; dayanıklılık, işlenebilirlik, yeter dayanım için gerekli hammaddelerin (çimento, agrega ve su) bulunabilirliği gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Beton heterojen bir maddedir. Makroskobik ölçekte çimento hamuru ve agregaların bir karışımı iken, mikroskobik ölçekte çimento hamurunun kendisi reaksiyona girmemiş çimento tanelerinden ve amorf hidratasyon ürünlerinden oluşmaktadır (Hilal, 2015). Yoğunluk açısından beton, hafif, normal ağırlık ve ağır beton gibi çeşitli tiplerde sınıflandırılabilir. Neville (2011), beton yoğunluğunda azalmanın gerçekleşebilmesi, agrega partiküllerinde (hafif agregalı beton), çimento hamurunda (hücreli beton) ve iri agrega taneleri arasına ince agrega atılarak (ince betonsuz) olmak üzere üç olası yerde bulunan hava boşluklarının yer değiştirilmesiyle sağlanabileceğini belirtmiştir.

Hafif betonlar yapısal ve dolgu-yalıtım amaçlı olmak üzere kullanım yerine özel olarak üretilmektedir. Bunlardan biri de ısı yalıtımı yani yapısal olmayan amaçlar için kullanılan 300 ile 800 kg/m³ arasında yoğunluğa sahip olan düşük yoğunluklu betonlardır (Neville, 2011). Isı iletim katsayısı göz önünde bulundurularak istenilen yoğunlukta üretilme (hem ekonomik hem de çevresel açıdan sürdürülebilir bir şekilde) ve ayrıca yeterli bir dayanımın elde edilebilme potansiyeli, köpük betonun değerini artırmıştır. Köpük beton üretiminde iri agrega kullanımının gerekmemesi ve ince agreganın kısmen veya tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemelerle değiştirilebilme imkanının bulunması, sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Jones ve McCarthy, 2006).

Günümüzde konutlarda ve endüstriyel yapılarda ısı yalıtımı, malzeme üretiminden uygulamasına kadar hassaslık ve çok yönlü detay çalışma gerektiren, birçok bilim dalını kapsayan bir sistemler bütünü olarak değerlendirilir. Isı yalıtım malzemelerini birbirinden ayıran en temel özellik ısı iletim katsayılarıdır. Uygulamaya göre diğer özellikler olarak yoğunluk, mekanik dayanım, yangın dayanım sınıfı, su buharı difüzyon direnci, su emme ve boyutsal kararlılık göz önüne alınmaktadır (Harun, 2016).

Bu tez kapsamında; Türkiye için konvansiyonel ısı yalıtım malzemelerine alternatif arayışında, istenilen özelliklere sahip olması yanında mevcut malzemelerle rekabet edebilecek yerli malzemelere odaklanılmıştır. Bu kapsamda, geliştirilecek ısı yalıtım malzemesinde temel hammadde olarak mikronize kuvars, çimento, kireç, uçucu kül, amorf silika ve metakaolin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Dolayısıyla, ısı yalıtım malzemelerinin yeterli basınç dayanımına, düşük ısı iletkenlik hesap (λ) değerine, yüksek yanma direncine ve boyutsal kararlılığa sahip olması ve montaj özelliklerinin konvansiyonel malzemeler ile benzerlik göstermesi göz önüne alınmıştır. Kullanılan hammaddeler köpük betona istenilen özellikleri kazandırmalı ve mevcut ürünlerle rekabet edebilmelidir. Tümüyle yerli hammaddelerin kullanımı sürdürülebilir ısı yalıtım malzemeleri üretiminde dışa bağımlılığın azaltılmasına büyük katkı sağlayacaktır. Ayrıca, yerli ısı yalıtım malzemeleri üzerine yürütülen araştırmaların geliştirilmesine büyük ivme kazandıracağı beklenmektedir.

1.1. Çalışmanın Önemi

Dünya’da ve Türkiye’de ticari bir ürün olarak piyasada otoklavlanmış köpük beton “ısı yalıtım malzemesi” bulunmamaktadır. İnşaat aşamasında ve yalıtımsız mevcut binaların dış cephe mantolamalarında uygulanabilir olması oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında elde edilmesi hedeflenen değerlere sahip bir otoklavlanmış köpük betona bugüne kadar yapılmış bilimsel çalışmalarda rastlanmamıştır. Kullanılacak hammaddelerin kolay temin edilebilir ve ucuz olması, çalışmanın diğer özgün bir yönünü oluşturmaktadır. Bu tür malzemelerin kullanılabilirliğini etkileyen en önemli unsurlardan biri maliyettir. Dolayısıyla büyük oranda yerli hammaddeye dayalı, ısı yalıtım performansı ve mekanik özellikleri istenilen düzeyde, yangına dirençli ve hafif özelliklere sahip bir köpük betonun yine yerli teknoloji ile üretiminin sağlanabileceği öngörülmektedir. Özellikle yapılarda yükün azaltılması ve ısıtma-soğutma amaçlı enerji kullanımında tasarruf sağlanması, inşaat sektörü için büyük bir kazanım olacaktır. Ayrıca Türkiye’nin bir deprem bölgesi olması gerçeği ve neden olduğu can ve mal kayıpları yanında yapılar için harcanan enerji tüketimi ve hammadde ithalatının azaltılmasına yönelik katkının önemi büyüktür.

Türkiye’de ısı yalıtım malzemeleri pazar hacmi yaklaşık 5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir (Aytaç, 2022) Bu pazarın büyük oranda yurt dışı kaynaklara bağlı olması önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Günümüzde yangın yönetmeliği gereği; yüksekliği 20 m’ye kadar olan binalarda polistren veya poliüretan kökenli (EPS, XPS gibi) yalıtım malzemelerinin ve 20 m’den daha yüksek binalarda ise cam yünü ve taş yünü, sıkıştırılmış dış cephe mantolama levhaları ya da mineral kökenli (multipor, lithapor gibi) malzemelerin kullanımına izin verilmektedir. Petrol türevli ısı yalıtım malzemelerinin hammaddesi tamamen yurt dışından ithalat yoluyla temin edilirken, cam yünü ve taş yünü ısı yalıtım malzemeleri üretimi know-how sözleşmelerine dayalı yapılmaktadır. Know-how sözleşmeleri yasal koruma altında olmamakla birlikte piyasa rekabet gücü sağlayan gizli bilgi ve deneyimleri kapsar. (Barutcu, 2021)

Çalışma kapsamında hedeflenen ısı yalıtım malzemesinin geliştirilebilmesi ve istenilen teknik özelliklerin sağlanabilmesi durumunda, konvansiyonel ısı yalıtım malzemelerine alternatif ve büyük oranda yerli hammadde kaynaklarına dayalı bir yapı malzemesi kazanımı sağlanacaktır. Bu yapı malzemesinin endüstriyel üretime dönüştürülebilmesi durumunda ise söz konusu ekonomik kayıplar büyük oranda azaltılmış olacaktır. Ayrıca konvansiyonel malzemelere göre büyük avantajlar sunabilecek böyle bir malzeme, önemli bir ihracat potansiyeli de taşımaktadır.

1.2. Araştırma Kapsamı

Türkiye’de yalıtım malzemesi sektörünün %70 üzerindeki payını, petrol türevli (EPS, XPS) ve mineral kökenli (multipor, lithapor gibi) ürünler oluşturmaktadır. Türkiye’de söz konusu malzelerin üretimi yapılmakta ise de gerekli hammadde teminindeki dışa bağımlılık ve bunların bir kısmının petrol türevi olmaları kullanımını kısıtlayıcı ve çevre açısından sorgulanır bir tablonun ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma kapsamında mekanik özellikler üzerinde etkili olan C-S-H bağ oluşumunu geliştirmek üzere daha ince boyutlu ve silika esaslı mikronize kuvars, amorf silika, metakaolin ve uçucu kül gibi yerli kaynaklardan sağlanacak malzemelerin kullanımına yer verilen bir ısı yalıtım malzemesi olarak otoklavlanmış köpük beton üretim imkanları araştırılacaktır.

Köpük beton, temel olarak iri agrega içermeyen ince daneli çimento harcından elde edilmektedir. Kullanılan köpük nedeniyle oldukça boşluklu yapıya sahip bir beton türüdür. Köpük betonda farklı katkı maddelerinin değişen oranlarda kullanımı mekaniksel ve yapısal özelliklerinde büyük bir değişkenliğe neden olabildiğinden, son yıllarda konuyla ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Nitekim Dünya’da ve Türkiye’de ticari bir ürün olarak piyasada otoklavlanmış köpük beton “ısı yalıtım malzemesi” yoktur. Bu konuyla ilgili yapılmış geniş kapsamlı çalışmaların yokluğu/yetersizliği, bu çalışmanın gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında özellikleri itibarıyla elde edilmesi hedeflenen değerlere sahip otoklavlanmış köpük beton bilimsel çalışmalarda yer almamaktadır. Bu geliştirilebilecek olan malzemenin, hem proje - inşaat aşamasında ve hem de yalıtımsız mevcut binaların dış cephe mantolamalarında uygulanabilir olması hedeflenmektedir.

Hedeflere ulaşılabilmesi durumunda;

Türkiye inşaat sektörü için;

- ✓ Büyük oranda yerli hammaddelere ve tamamıyla yerli teknolojiye dayalı,
- ✓ Yüksek ısı yalıtım performansına ve yeterli mekanik özelliklere sahip,
- ✓ Yangına yüksek direnç gösteren,
- ✓ Düşük yoğunluk oranı gibi fonksiyonel özellikleri de sergileyen
- ✓ Kolay uygulanabilir, erişilebilir, ekonomik ve sürdürülebilir

bir yapı malzemesi elde edilmiş olacaktır.

1.3. Amaç ve Hedefler

Bu çalışmanın amacı otoklav kullanarak köpük betondan binalar için yanmaya karşı direnci yüksek, ekonomik ve tamamen yerli kaynaklara ve teknolojiye dayalı bir duvar dolgu ve ısı yalıtım malzemesi geliştirilmesi ve mühendislik özelliklerinin araştırılmasıdır.

Tez kapsamında temel hammadde olarak mikronize kuvars, amorf silika, metakaolin ve F sınıfı uçucu kül gibi silika esaslı malzemelerin kullanılması hedeflenmektedir.

Bu şekilde yerli kaynakların daha verimli bir şekilde kullanımı, bölge ve ülke ekonomisine önemli derecede katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

Üretilcek olan malzemenin, 100-400 kg/m³ kuru yoğunlukta, 0.5-2 MPa basınç dayanımında, yangına direnci yüksek, ısı iletkenlik katsayısı (yoğunluğuna bağlı olarak) 0.10-0.050 W/mK, düşük rötre değerine sahip ve alternatiflerine göre daha ekonomik olması hedeflenmektedir. Ülkemizde yıllardır köpük betondan duvar ve döşeme elemanı üretimine yönelik yoğun endüstriyel çaba sarf edilmiştir. Buna karşılık, başta kuruma büzülme sorunu olmak üzere bir takım teknolojik problemlerin çözümünde başarılı olunamamıştır. Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bulguların Türkiye’de köpük betonun endüstriyel bir yatırıma dönüşmesinin sağlanması ve buna dayalı yatırımların ülkemizde yaygınlaşması amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1. Hafif Betonlar

Hafif betonun binlerce yıllık bir geçmişe sahip olduğu bugün hala varlığını sürdüren pek çok tarihi eserden kolayca anlaşılabilmektedir. Sümerler ve sonrasında özellikle Romalılarca volkanik kökenli agrega esaslı hafif beton benzeri bir malzemenin sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Yine Piramitler ve Meksika'daki Maya zaman çerçevesinde de kullanım alanı bulunduğu bildirilmektedir (Nadh ve Muthumani, 2017). Hafif betonun bilinmesine ve bugüne kadar oldukça başarılı sonuçlar alınmasına rağmen hala kapsamlı çalışmalara konu olmakta ve üzerinde tartışılmaya devam edilmektedir (Thienel vd., 2020).

Hafif beton tanımında kullanım yeri (taşıyıcı duvar ya da yalıtım bloğu) ve amacına bağlı olarak dayanım, yoğunluk ve diğer özellikler için birtakım farklılıklarla karşılaşılabilmektedir. Hafif beton türleri içerisinde en yüksek yoğunluklu grubu oluşturan ve minimum 17 MPa basınç dayanımına sahip betonlar doğal olarak düşük yük taşıma kapasitesine sahip zeminler ve taşıyıcı elemanlarda ve düşük yoğunluklu ve 300- 800 kg/m³ dayanıma sahip hafif betonlar ise ısı yalıtım amaçlı olarak kullanılmaktadır (Neville, 1995). Dolayısıyla genel olarak, düşük yoğunluklu agrega kullanımı ve/veya farklı üretim teknolojileri içeren normal betondan daha düşük yoğunluklu betonların hafif beton olarak tanımlanabileceği değerlendirilmektedir (Anonymous, 2018). Elango vd. (2021) normal beton yoğunluğunun 2400 kg/m³ ve hafif beton yoğunluğunun ise 1400- 2000 kg/m³ arasında olduğunu belirtmişlerdir. Newman ve Owens (2003), geleneksel beton yoğunluğunun 2100-2500 kg/m³, küp dayanımının 15-100 MPa ve termal iletkenliğin 1.6–1.9 W/mK aralıklarında değiştiğini, hafif beton için ise söz konusu değer aralıklarının 300-2000 kg/m³, 1–60 MPa ve 0.2–1.0 W/mK şeklinde değiştiğini bildirmişlerdir. Thienel vd. (2020) ise Amerika'da 28 günlük basınç dayanım değerinin 40 MPa olmasının yüksek dayanımlı hafif beton olarak sınıflandırılmasını sağlarken, Avrupa'da 8 MPa'lık silindir dayanımı ve 9 MPa'lık küp dayanımının yapısal hafif beton standardını karşıladığı ve Almanya'da ise hafif beton için 800- 2000 kg/m³'lük fırın kuru yoğunluk arandığını değerlendirmişlerdir. Amerika Beton Enstitüsü, hafif betonu tümüyle hafif agregalı ya da hafif ve normal yoğunluklu agregalı olarak daha düşük

yoğunluklu (1120- 1920 kg/m³) beton olarak tanımlamakta ve ACI-213R standardı kapsamında yapısal düşük yoğunluklu (hafif) betonu düşük yoğunluklu agregâ ile yapılan ve hava kuru yoğunluğu 1850 kg/m³ ve 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'dan yüksek beton olarak bildirmektedir (Anonymous, 2022).

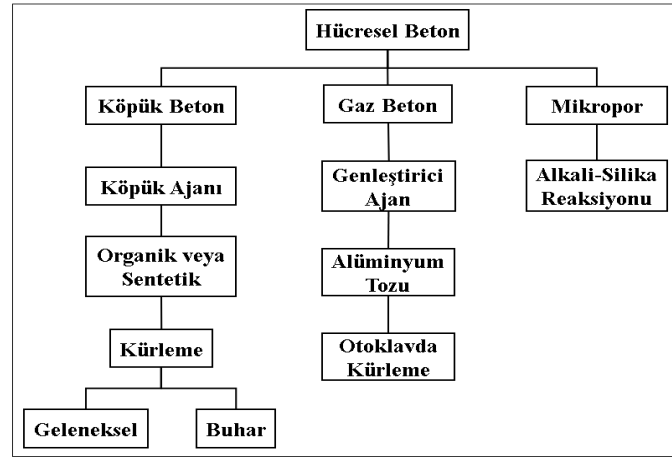
2.1.1. Hafif beton türleri ve kullanım alanları

Hafif beton üretiminde başvuru yöntemleri genel olarak; Normal agregaların tümüyle ya da kısmen, boşluklu hafif agregâ ile değiştirilmesi, fiziksel veya kimyasal yollarla %30-50 boşluk içerecek bir yapının oluşturulması ve normal agregadan ince agreganın çıkarılması (kumsuz) şeklinde sıralanmaktadır (Newman ve Owens, 2003). Türkiye'de söz konusu yöntemler arasında sıklıkla başvuru boşluklu doğal ya da yapay hafif agregâ (pomza, volkanik tüf ve cüruf) kullanımıdır (Türkel, 2007).

Günümüzde üzerinde sıklıkla çalışılan hafif betonlar arasında normal agregâ-boşluklu hafif agregâ değişimi (hafif agregalı beton) ve yüksek düzeyde boşluklu bir yapının sağlandığı (hücreli; gaz ve köpük beton) yöntemlerle elde edilen türlerin ön plana çıktığı gözlenmektedir. Hafif agregalı betonlarda pomza, diatomit, cüruf, volkanik kül, talaş ve pirinç kabuğu gibi doğal agregalar ve imal kül, kok kömürü külü, köpüklü cüruf, şişirilmiş kil, genişletilmiş şeyl ve sleyt, sinterlenmiş uçucu kül, pulsu vermikülit, genişletilmiş perlit ve termokol boncuk gibi imal agregaların kullanımı söz konusudur (Mohammed ve Hamad, 2014).

Gaz ve köpük beton ile mikropor hücreli beton türleri arasında gözenekli sistem ve gözeneklerin ortalama boyut farklılığı söz konusudur. Gaz ve köpük beton türleri çok sayıdaki makroskopik boşluk içerirler. Mikropor hücreli beton türünde oldukça seyreltik ve priz sürecinin başlamasıyla birlikte havanın içeri girmesini sağlayan kireç harcı kullanılmaktadır (Chica ve Alzate, 2019).

Yakın geçmiş dönemlerde yüksek binalarda yükün azaltılması amacıyla duvar ve döşemelerde, köprü, viyadük, gemiler ve açık deniz platformlarında uygulama alanı bulan hafif betonların (Bremner, 2008) günümüz genel kullanım amaç ve alanları



Şekil 2.1. Hücresel beton türleri

Agrawal vd. (2021) tarafından çatılarda ısı yalıtımı, genel yalıtım ve ses duvarları, prefabrik blokların üretimi, yalıtımlı su boruları, zemin ve çatı levhaları için dolgu, bölme duvarlarının yapımı, uzun kirişli köprü tabliyeleri, yangın ve korozyondan koruma, mimari amaçlı kaplama olarak sıralanmaktadır.

2.2. Köpük Beton

Betonun yoğunluğunu azaltmanın en etkili yöntemleri, harç ortamında gaz veya hava ile kararlı boşluklar oluşturulmasına dayalı uygulamaları içerir. Harç içerisinde çimento esaslı bir bağlayıcı, kum gibi ince agregalar ve hava kazanımı sağlamaya yönelik köpürtücü bir ajandan elde edilen köpüğün bulunduğu nispeten homojen hafif hücresel betonlar köpük beton olarak değerlendirilmektedir (Amran vd., 2015; Jalal, 2017). Brady vd. (2001), köpük betonun, Van Deijk (1919) tarafından alıntılanan şekliyle, minimum yüzde 20 (hacimce) mekanik olarak sürüklenen köpük içeren çimento harcından üretilen bir beton olarak tanımlandığı bildirmektedir. Benzer değerlendirmeye Awang vd. (2012a)'ce de yer verilmiştir. Köpük betonun, sıkıştırma gerektirmemesi, akıcılığının dar ve düzensiz boşlukların doldurulmasında kolaylık sağlaması, önemli yükseklik ve mesafelerde pompalamanın kolay olması gibi nedenler (Jalal, 2017) ve uygun termal özelliği, üretim ve yıkım kolaylığı ve nispeten düşük üretim maliyeti gibi etkenler, son yıllarda özellikle aynı amaç için kullanılan diğer hafif malzemelere göre kullanımının belirgin şekilde artmasına yol açmıştır (Bindiganavile ve Hoseini, 2019).

2.2.1. Köpük betonun özellikleri

2.2.1.1. Köpük betonun bileşenleri

Artan nüfus ve barınma gereksinimi, kent yerleşim alanlarının hızla büyümesine yol açarken geçmişte ve yeni inşa edilen yapılarda enerji tasarrufu ve ekolojik sorunları hafifletmek amaçlı birtakım önlemler alınması ve yeni teknolojiler üretme çabalarını hızlandırmıştır. Bu kapsamda öne çıkan uygulamalardan biri olan köpük beton üretimiyle ilgili olarak temel bileşenlerde pek değişiklik görülmediği ancak yardımcı ya da ek bileşenler için aynı değerlendirmede bulunulamayacağı gözlenmektedir. Üretiminde kullanılan ince agrega fraksiyonunun, kısmen veya tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemeler ile değiştirilebilir olması nedeniyle birincil agregalara olan talebin azalması ve bu kapsamda sürdürülebilirliğe katkı sağlanması söz konusudur (Awang vd., 2012b).

Köpük beton bileşenlerinde bazı farklılıklar görülmekle birlikte genel olarak temel bileşenlerin bağlayıcılar, ince agrega, köpük ve su ve tamamlayıcı/ek malzemelerin ise lifler ve diğer katkı maddelerinin olduğu bilinmektedir (Amran vd., 2015; Kavitha ve Mallikarjunrao, 2018; Amran vd., 2020).

Bağlayıcılar; köpük betonda bağlayıcı olarak kullanılan temel malzeme Portland çimentosudur. Diğer çimento türleri de kullanılabileceği gibi (Siram, 2013), çimentonun tümü ya da bir kısmı yerine silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, diğer bazı yakıt külleri, yumurta kabukları, düşük değerli sıvı cam, manyezit tozu vd. bazı malzelerin de bağlayıcı/tamamlayıcı olarak kullanılabileceği gözlenmektedir.

Agregalar; en yaygın olarak kullanılan ince agrega inorganik kumdur. Doğal ya da kırma kum yanında kullanılabilir nitelikte diğer bazı yapay veya atık malzemelere de (granit tozu ya da organik ince parçacıklar kumu kısmen veya tamamen değiştirmek için) yer verilebilir. İnce agrega oranı ve boyutu ile köpük betonun dayanımı ilişkisi kapsamında düşük oranlarda iri agrega kullanımı söz konusu olabilir.

Su; köpük beton üretiminde kullanılan suyun kalitesi köpük özelliğini de etkileyebildiğinden askıda katı madde ve diğer kirleticilerden arı, temiz ve

çoğunlukla içilebilir nitelikte olması istenir. Köpük beton su gereksinimini, harç tasarımı karışımı bileşenlerine bağlı olarak uygun işlenebilirlik kıvamı belirler.

Lifler; köpük betonda kullanılan sentetik veya doğal liflerin mekaniksel özelliklerde iyileşme sağladığı bilinmektedir. Çelik liflerin kullanımı önerilmezken cam elyaf, sentetik elyaf (poliamid, polivinil alkol, polipropilen) ve karbon elyafın uygun olduğu gözlenmektedir. Lif boyut ve miktarları değişebilmektedir.

Katkı maddeleri; köpük beton için farklı bir özellik kazanımı sağlamak üzere bazı katkı maddelerinin kullanımı söz konusu olabilmektedir. Bu kapsamda çoğunlukla su azaltıcı, itici, geciktirici ve hızlandırıcılara yer verilebilmektedir. Etkili bir plastikleştirici olan flor yüzey aktif maddesi karışım suyu miktarını azaltarak harcın hareketliliğini ve plastisitesini kolaylaştırmakta ve betonun dayanım performansını artırmaktadır. Ancak kullanılan katkıların karışımdaki diğer bileşenlerle uyumluluk testlerinin yapılması gereklidir.

Köpük ajanları; köpük bir gazın sıvı ortamında zarlarla ayrılmış kabarcıklar oluşturduğu yapıdır. Köpük ajanları, yüzey gerilimini azaltarak daha fazla köpük kabarcığı oluşumunu teşvik eden katkı maddeleridir (Kim ve Jeong, 2012). İki sıvı ya da bir sıvı ile bir katı arasındaki yüzey gerilimini azaltan (ara-yüz gerilimini) hem hidrofobik hem de hidrofilik grupları içeren özel tip moleküllerin oluşturduğu maddeler, yüzey aktif maddeler ya da sürfaktanlardır. Sürfaktanların elde edildikleri kaynaklara yani kökenlerine göre doğal ve sentetik olarak sınıflandırılması yanında, sentetik sürfaktanların polar gruplarda yük bulunup bulunmamasına göre iyonik ve iyonik olmayan şeklinde farklı bir değerlendirmeye konu edilebildiği gözlenmektedir (Sahu vd., 2018).

Proteinlerde gerçekleşen parçalanma yani moleküllerin peptit bağlantılarının kopması daha hidrofobik küçük moleküllerin oluşmasına yol açmakta ve böylelikle çözeltinin yüzey gerilimi azalmakta ve hava kabarcıkları için bir arayüz oluşmaktadır (Panesar, 2013). Bitkisel kaynaklı doğal sürfaktanların etkinliği saponin içermeleriyle ilişkilidir (Siva vd., 2017; Sahu vd., 2018). Keza saponinler, sulu solusyonlarda güçlü köpürme ve yüzey gerilimini azaltma özelliği sergileyen glikozitlerdir (Güçlü ve Uyanık, 2004).

Köpük beton çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan köpük ajanlar sentetik ve protein esaslı olmakla birlikte (He vd., 2019; Ghorbani vd., 2019) , kompozit (Ai, 2016; Sahu vd., 2018), alüminyum tozu ve hidrojen peroksit, deterjanlar, tutkal reçineleri ve saponinlerin de (Chica ve Alzate, 2019) kullanılabildiği bildirilmektedir.

2.2.1.2. Köpük betonun fiziksel özellikleri

Köpük betonun yoğunluk, kuruma büzülmesi, gözeneklilik, adsorpsiyon ve geçirgenlik gibi fiziksel özellikleri arasında yoğunluğun diğer beton özellikleri üzerindeki baskın etkileri nedeniyle özel bir yer tuttuğu gözlenmektedir. Bu bağlamda köpük betonun tasarlanan yoğunluğu, taze harç yoğunluğu ve kuru yoğunluk ilişkilerinin iyi irdelenmesi gerekmektedir.

Yoğunluk; tasarım bileşenleri ve oranlarının köpük beton yoğunluğu üzerine etkisinin asıl olarak köpük ajanı tipi ve miktarı kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca köpük stabilitesine bağlı olarak kabarcık patlamasının kuru yoğunluğun azalmasını engellediği bilinmektedir (He vd., 2019). Yukarıda sayılan nedenlerle, araştırmacıların sıklıkla taze yoğunluk, tasarlanan yoğunluk ve kuru yoğunluk arasında tutarlılık ve kabul edilebilir düzeylerdeki farklılıklara değindiği gözlenmektedir (He vd., 2019; Peng vd., 2022; Yuan vd., 2022).

Abd Elrahman vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen, yoğunluğu 500 kg/m³'ten düşük köpük beton geliştirilmesi kapsamlı bir çalışmada; elde edilen beton yoğunluklarının tasarlanan değerlere (450–500 kg/m³) yakın olduğu, uçucu kül ilavesiyle kuru yoğunluğun biraz arttığı ancak ince hafif agregaların kendilerine özgü farklı özellikleri nedeniyle etkinliğin değiştiği ve söz konusu betonun özelliklerini optimize etmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç bulunduğu bildirilmiştir.

Kuruma büzülmesi; köpük betonda yüksek kuruma büzülmesi, çatlak oluşumuna yol açması ve mekaniksel özellikleri olumsuz etkilemesi nedeniyle konuyla ilgili çalışmalarda kuruma büzülmesi, mutlak yer verilmesi gereken bir özellik olarak değerlendirilebilir. Nitekim kuruma büzülmesinin, genellikle harç dökümü sonrası ilk 20 günde görüldüğü ve karışım tasarımındaki agrega tipi, çimento oranı, su içeriği

ve mineral katkıları nedeniyle normal betona göre 4-10 kat daha fazla gerçekleştiği kabul edilmektedir (Amran vd., 2015).

Köpük betonun ana kuruma büzülmesinin ilk 14 gün içinde meydana geldiğini belirten Sun vd. (2018), köpürtücü ajan türünün diğer bazı özellikler yanında kuruma büzülmesini de etkilediğine değinmiştir. Köpük hacmindeki artışın içerisinde hapsolmuş hava barındıran gözenek boyutunda büyüme ve dolayısıyla harcın daha az su emmesine neden olarak büzülmeyi azalttığı bilinmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2009). Yine, harç karışımına lif ilavesinin su tutma ve buharlaşmayı geciktirme etkileri nedeniyle köpük betonun kuruma büzülmesini azalttığı belirtilmektedir (Raj vd., 2019).

Gözeneklilik; köpük betonun gözenek yapılanması (bireysel gözenek boyutları, toplam gözenek, dağılım durumu ve homojenliği, sürekliliği) diğer özellikler üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Geleneksel beton gözenek sistemi jel gözenekler, kılcal gözenekler ve makro gözeneklerden (sürüklenen hava ve yetersiz sıkıştırma kaynaklı) oluşmaktadır. Köpük betonun gözenekliliğini sürüklenen hava boşlukları ile harç içindeki boşlukların toplamı oluşturur (Kearsley ve Wainwright, 2001; Raj vd., 2019). Köpük betonun iri agrega içermemesi ve kendiliğinden yerleşen bir beton olması nedenleriyle hava sıkışması kaynaklı gözenek oluşumu ihmal edilebilir niteliktedir. Hava boşluğu dağılımı düşük köpük hacmi uygulamalarında daha homojendir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007).

Adsorpsiyon ve Geçirgenlik; köpük betonun su adsorpsiyon ve geçirgenlik özellikleri betonun uzun süreli dayanımı üzerinde etkilidir. Köpük betonun harç karışımı içeriği ve dolayısıyla gözenek yapısı su adsorpsiyonu ve geçirgenliğinde belirleyici bir role sahiptir. Gözenek sayısının fazla ve sürekli olduğu durumda su adsorpsiyon ve geçirgenliği yüksek olmaktadır (Raj vd., 2019; Wang vd., 2019).

Köpük beton su adsorpsiyon ve geçirgenlik özelliklerinin iyileştirilmesi için bazı ek materyallere yer verilebilmektedir. Nitekim belediye katı atık yakma tozu içeren köpük betonda su adsorpsiyonunu artıran bağlantılı büyük gözenek sayısının kuru yoğunluğun artmasıyla azaldığı ve yine geçirimsizlik süresi uzadığı ve geçirimsizliğin arttığı belirlenmiştir (Dong vd., 2022). Yine Wang vd. (2019), köpük betonda düşük

oranda kırıntı kauçuk kullanımının su geçirmezlik performansını iyileştireceğini bildirmiştir.

2.2.1.3. Köpük betonun mekanik özellikleri

Basınç dayanımı; köpük beton basınç dayanımı, beton harç karışım süreci başlangıcından kürlenme sonuna değin pek çok faktörün etkisi altında şekillenmektedir. Gözenek yapılanması ve yoğunluk basınç dayanımı üzerinde anahtar rol oynamaktadır. Köpük ajanı türü, oranı, üretimi ve harca ilavesi yanında diğer harç bileşenlerinin tür ve oranları ile kürlenme şartları basınç dayanımında farklılaşmalara yol açmaktadır. Kür koşullarının (selofan levhaya sarılı, havada ve suda), çimento tipinin (CEM I 52.5-R ve CEM II A-L 42.5 R), köpürtücü ajanın (Foamin C, SLS, Foam Tek) ve kuru yoğunluğun (400, 600 ve 800 kg/m³, +-50) 28 günlük basınç dayanımının gelişimine etkisini araştırıldığı çalışmada; protein bazlı Foamin C'nin sabit su/çimento oranı için daha yüksek basınç dayanımları sağladığı ve bunun CEM I 52,5R yaklaşık on kat ve CEM II A-L 42,5R için ise yaklaşık üç kat olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, selofan levhaya sarılı kürlenme koşullarında en iyi basınç dayanımları elde edilmiştir (Falliano vd., 2018)

Yarmada çekme ve eğilme mukavemeti; köpük betonda eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı normal betondan daha yüksektir. Köpük betonun özellikle eğilme ve çekme gibi zayıf mekanik özelliklerini geliştirmek, çatlak oluşumu ve yayılımını kontrol etmek için farklı kökenlere sahip liflerin kullanımının oldukça yaygın olduğu gözlenmektedir. Köpük betona farklı sentetik elyaflar (Polipropilen, çelik, karbon elyaflar, polivinil alkol, bazalt ve asbest lifleri, plastik) ve doğal liflerin (ağaç, keten, bambu, sisal ve hindistan cevizi, muz, hindistan cevizi ve ananas yaprağı, kenevir ve kenaf) eklenmesinin etkilerini değerlendiren Khan vd. (2022) yarmada çekme, basınç ve eğilme gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği ve sentetik liflerin daha etkili olduğunu belirtmiştir. Azaltılmış yoğunluk nedeniyle köpük betonun önemli ölçüde daha düşük çekme mukavemeti gösterdiğini belirten Jhatial vd. (2022), %30 palm yağı yakıt külü ve %5 yumurta kabuğu tozu içeren beton karışımı için en yüksek basınç dayanımının elde edildiği ve %15.38 ve %5.16 daha düşük yarma çekme ve eğilme dayanımları bulunduğunu bildirmişlerdir. Basınç dayanımında artış, eğilme ve çekme dayanımında ise azalış söz konusudur.

Elastisite modülü; köpük betonda normal betona göre daha düşük olan elatisite modülü, yoğunluğun artmasıyla hızla büyüyen bir değişim göstermektedir (Mydin vd., 2012; Li vd., 2021). Köpük betonun elastisite modülü genel olarak basınç dayanımı arttıkça artar. Köpük betonda yüksek fırın cürufunun ince agrega olarak kullanılmasının basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri geliştirmesiyle ilgili bir çalışmada (Vu vd., 2022) elastisite modülü (R_{em}) ve basınç dayanımı (R_{bd}) arasındaki ilişki $R_{bd}=3.223 (R_{em})^{1.284}$ olarak bulunmuştur. Köpük beton için istenen yüksek elastisite modülünü sağlamanın alternatif bir yolu da elyaf takviyesidir. Dawood vd. (2018), köpük betona ilave edilen karbon fiberle yaklaşık %36 daha yüksek elastisite modülü elde etmişlerdir.

2.2.1.4. Köpük betonun fonksiyonel özellikleri

Köpük betonların ısı ve ses yalıtım özellikleri ile yanmaya direnci gibi fonksiyonel özelliklerine ilişkin kazanımlar, mekanik özellikleri etkileyen faktörlerden bağımsız değildir. Dolayısıyla söz konusu özelliklerin geliştirilmesine yönelik girişimlerde mekanik özellikler de değerlendirilmektedir.

Akustik özellikler; temelde köpük dozajına bağlı olarak şekillenen gözenek yapılanması köpük betonun normal betona kıyasla daha yüksek akustik absorpsiyon sergilemesine yol açmaktadır. Sodyum aljinat taneciklerinin yüzeyinin uçucu küllle kaplanması şeklinde bir çekirdek-kabuk yapılı kabarcık sistemi oluşturulması, düşük ve yüksek frekans bölgelerinde (50–400 Hz, 1600–3000 Hz) ses absorpsiyonu üzerinde önemli bir etki göstermemiş ancak orta frekansta (700–300 Hz) absorpsiyonun iyileşmesini (1600 Hz) sağlamıştır (Shang vd., 2022). Harç karışımında kullanılan diğer bazı bileşenlerin de akustik özellikleri etkilediği gözlenmektedir. Farklı atıklar arasında (göl tarama tortusu, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kalsiyum karbür cürufu) %60 çimento+%40 tarama tortusu uygulamasının ses bariyeri duvarları üretimine en uygun karışım olarak bulunduğu bildirilmiştir (Kou vd., 2022).

Termal iletkenlik; köpük betonun ısı iletkenliği üzerinde yoğunluk, gözenek boyutu, lifler, agrega tipi ve mineral katkıları belirleyici rol oynamaktadır (Raj vd., 2019).

Köpük beton yoğunluk artışı ısı iletkenlikte hızlı bir yükseliş yol açmaktadır (Xi vd., 2021).

Termal iletkenliğin en aza indirilmesi ve dayanımın mümkün olduğunca en üst düzeyde tutulması arasındaki dengenin sağlanması bir zorunluluk olarak görülmektedir. Protein bazlı köpürtücü ajan kullanımıyla daha homojen bir yapı sağlaması nedeniyle çok daha iyi termo-mekanik özellikler elde edilmekte ise de çimento türünün değiştirilmesiyle bu kez sentetik köpürtücü ajan kullanım potansiyelinin arttığı da gözlenmektedir (Gołaszewski vd., 2022).

Yangına dayanıklılık; köpük betonların yangına dayanıklılık özellikleri, aynı yoğunluk seviyesinde, bağlantısız-kapalı hava boşlukları ve homojen hücreli yapı varlığında daha yüksektir (Shang vd., 2022). Aslında köpük betonda iri agrega kullanılmaması söz konusu yapılmayı kolaylaştıran bir etmendir. Ancak köpük beton üretiminde yer alan bazı bileşenlerin yangına dayanıklılık özelliği üzerine etkileri karşıt bir durum sergileyebilmektedir.

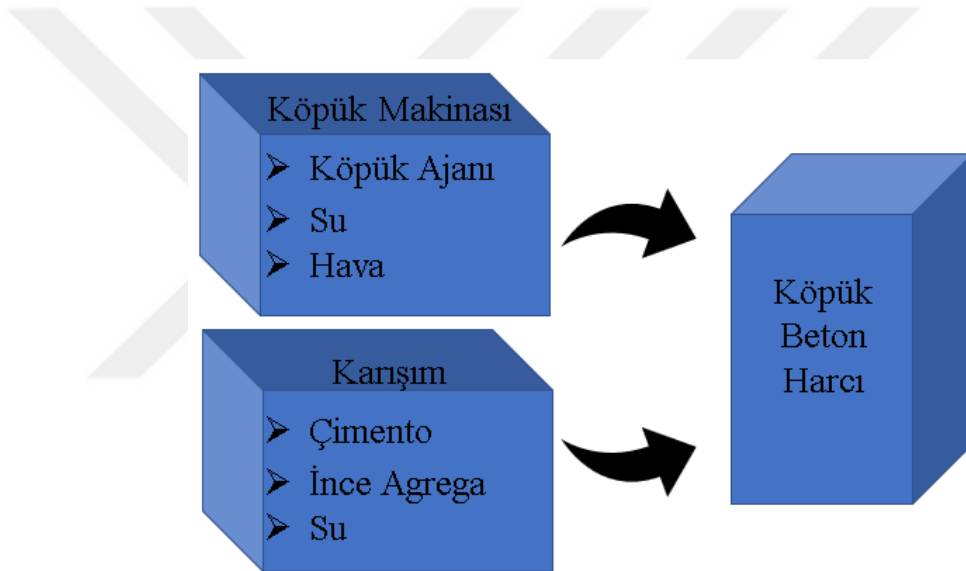
2.2.2. Köpük betonun üretimi

Köpük beton ana bileşenleri çimento, ince agrega, köpük ve sudur. Köpük beton üretiminde temel farklılık köpürtme işleminde gözlenmektedir ve ön köpürtme veya karışık köpürtme şeklinde uygulanabilmektedir. Ön köpürtme uygulamasında köpüğün ve temel harcın üretimi ayrı ayrıdır ve daha sonra karıştırılır. Su/köpük ajanı oranı, karıştırma süresi ve köpük oluşturma basıncı gibi parametreler kararlı köpük eldesi üzerinde etkilidir. Nitekim köpük betonun özellikleri büyük ölçüde köpük kalitesine bağlıdır (Brady vd., 2001). Karışık köpürtme uygulamasında ise köpük ajanının doğrudan temel harca ilavesi ve karıştırılması söz konusudur (Raj vd., 2019).

2.2.2.1. Köpük betonda kür koşulları

Kürleme koşulları beton harcının hidrasyon sürecini bariz bir şekilde etkiler ve bu durum katı faz kimyasal süreçleri ve gözenek yapılanmasında farklılıklar oluşturur. Dolayısıyla mekanik performans ve termal iletkenlik gibi özellikler kürlenme

yöntemi, sıcaklığı ve süresine bağlı olarak şekillenir. Mevcut durumda köpük beton basınç dayanımı ya da standart kür dayanımı belirleme koşullarının, yapı çevresel koşullarını tam olarak yansıtmaması söz konusudur ve inşaatlarda yaygın olarak kullanılan kürleme yöntemleri su püskürtmeli, doğal ve örtülü kürleme olarak sıralanmaktadır (Hu vd., 2016). Köpük beton farklı kürleme koşullarına ilişkin çalışmalarda çoğunlukla suda ve havada kürleme uygulamalarına yer verilmektedir. Farklı olarak selofan kaplama gibi kürleme yöntemleri de kullanılmıştır (Falliano vd., 2018; Falliano vd., 2022). Havada kürlemede kullanılan sabit sıcaklık ve nispi nem düzeyleri farklılıklar gösterebilmektedir. Ayrıca değişken sıcaklıklar altında kürleme uygulamaları da söz konusudur (Chen vd., 2022). Diğer taraftan suda kürlemede çoğunlukla 30°C sıcaklık derecesiyle karşılaşılmaktadır.



Şekil 2.2. Ön köpürtme yöntemli köpük beton harcı hazırlanışı

2.2.2.1. Köpük betonun avantajları ve dezavantajları

Köpük betonun geleneksel betona göre avantajlı yönleri içerisinde çoğunlukla yerinde, basit, ucuz ve daha hızlı üretim süreci ile düşük nakliye maliyeti belirtilmektedir. Düşük yoğunluklu köpük beton bir taraftan ölü yük azalışı sağlarken diğer taraftan hücreli mikro yapı kazanımı nedeniyle daha iyi yalıtım özellikleri sergilemektedir. Geleneksel betona göre iyileşmiş ısı iletkenliği, ses emilimi ve yangına direnç özellikleri göstermektedir (Serudin vd., 2019). Köpük betonun sayılan bu avantajlarına karşın büzülme ve dayanım düşüklüğü anahtar niteliğindeki dezavantajlarıdır (Raj vd., 2020; Bayraktar vd., 2022).

2.2.2.2. Köpük betonun kullanım alanları

Köpük betonun inşaat ve yapı mühendisliğinde oldukça geniş bir kullanım alanı söz konusudur. Kullanım amaçları çoğunlukla hafif yapı malzemesi üretimi, boşluk doldurma ve yalıtım olarak sıralanmaktadır.

Yapısal amaçlı kullanımlarda yüksek yoğunluklu köpük beton boşluk doldurma ve yalıtım amaçlı kullanımlarda ise düşük yoğunluklu köpük betona yer verilmektedir. Bu kapsamda köpük beton bina, kara ve hava yolları, tüneller, köprüler, kanallar, kanalizasyon sistemleri, depolama tankları ve bodrumlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tian vd., 2009; Ma, 2022; Mansyur vd., 2022).

2.3. Rötire

Betonda kısmen ya da tümüyle sertleşme sürecinde, çimento hidratasyonu, karbonatlaşma, buharlaşma, beton kalıpları ya da zemin tarafından suyun emilmesi ve diğer nedenlerle mevcut su içeriğindeki azalma 3 boyutlu orantılı bir hacim küçülmesine yol açar. Rötire (büzülme) olarak tanımlanan bu değişim, kimyasal, termal ve hidrolojik süreçlerle ilgilidir. Bu süreçlerin etkisi altında, farklı büzülme türlerinin birleşimi olarak gerçekleşen büzülme olayı karmaşık bir süreç olarak değerlendirilmektedir. Karbonatlaşma rötresi dışında diğer rötire türlerinin temel nedeni suyun kullanımı ya da kaybıdır (Šahinagić-Isović vd., 2012).

2.3.1. Rötire türleri

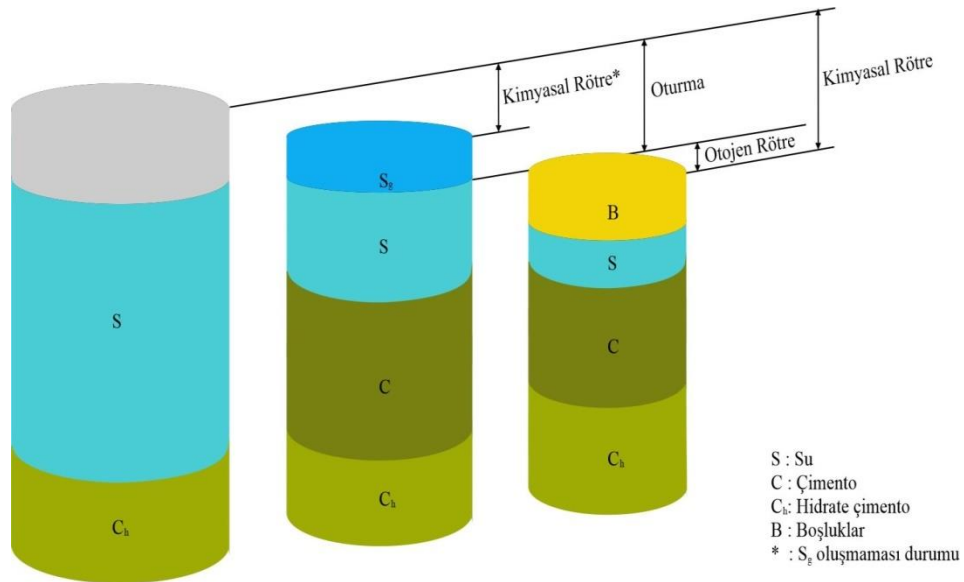
Betonda rötire türleri çoğunlukla plastik büzülme, kimyasal büzülme, otojen büzülme, kuruma büzülmesi, termal (sıcaklık) büzülmesi ve karbonatlaşma büzülmesi olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.3’de otojen ve kimyasal rötire görselleştirilmiştir.

Plastik büzülme; taze beton yüzeyinde ilk birkaç saat içinde çok hızlı gelişen ve diğer rötire türlerine göre daha büyük olan plastik büzülme, karışımdaki agrega ve çimentonun hidratasyonu ve suyun yüzeyden hızlı buharlaşması ve/veya matriks emiliminin bir sonucudur. Matriks kılcal kanallarında negatif basınç artışı karışımda plastik büzülmeye yol açmaktadır. Artan çimento miktarı, plastik büzülmede artışa

neden olur. Plastik büzülme kaynaklı yüzeysel çatlakların oluşumunun önlenmesinde doğru ve yoğun beton kürü uygulamaları (ıslatma ya da membran kaplaması) ile kaybedilen suyun geri kazanımı veya buharlaşmasının önlenmesi gereklidir. (Tang vd., 2021).

Kimyasal büzülme; çimento ve suyun mutlak hacimleri toplamı ile beton harcın hacmi arasındaki fark kimyasal büzülme olarak tanımlanmaktadır. Hidrasyonun neden olduğu hacim azalışı olarak değerlendirilmektedir. Çimento hidrasyonu devam ettiği sürece kimyasal büzülme artışı da sürmektedir ve dolayısıyla kimyasal büzülme otojen büzülmenin temel nedenlerinden biri olarak görülmektedir (Šahinagić-Isović vd., 2012).

Otojen büzülme; kimyasal ve otojen büzülme türlerini kesin hatlarla birbirinden ayırmak kolay değildir. Nitekim kimyasal büzülme ve sonrasında devam eden hidratasyon nedeniyle tüm suyun bağlanması ve ek gözeneklerin oluşumu söz konusudur. İşte sürekli hidratasyon sırasında gözenek doygunluğunun azalmasından kaynaklanan kendiliğinden kuruma büzülmesi olarak tanımlanan otojen büzülme, harç karışımından kısa süre sonra başlar. Hidratasyon derecesi otojen büzülme gelişiminde belirleyici rol oynar (Šahinagić-Isović vd., 2012; Tang vd., 2021).



Şekil 2.3. Otojen ve kimyasal rötür (Tazawa, 1999)

Kuruma büzülmesi; harç ortamında artan buharlaşma gözenek suyunda negatif basınç oluşumuna yol açar. Artan negatif basınç ve menisküs yarıçaplarının giderek küçülmesi harç bileşenlerinin birbirlerine daha fazla yaklaşmalarına yol açar. Yüzeylerinde giderek azalan adsorbe su zarfı kalınlığı ve dolayısıyla aralarında çekim gücü artan taneler birbirlerine daha fazla yaklaşır ve hacim küçülür. Temel olarak kuruma büzülmesi, su kaybı nedeniyle beton hacmindeki azalmaya karşılıktır. Kuruma büzülmesi, plastik akışın sona ermesi ve ilk prizlenmeden sertleşme aşamasına kadar birkaç yıl sürebilen bir süreçtir (Tang vd., 2021).

Termal (sıcaklık) büzülmesi;  imento ve suyun kimyasal reaksiyonu sürecinde serbestlenen hidratasyon ısısı genleşmeye yol açar. Dökümden sonra tipik olarak ilk 12 saatte gerçekleşen bu süreç termal genleşme olarak bilinir. Beton enkesiti boyunca soğumaya başlayıp katmanları arasında ısıl dengeye ulaşılırken gradyanlı eşit bir sıcaklık varsa, bir ısıl şekil değiştirme oluşur. Beton yüzey sıcaklığında ve dolayısıyla matriksin i  ve dış yüzeyi arasında ortam sıcaklığı farklılıkları ve dalgalanmaları nedeniyle termal büzülme gelişir (Elzokra vd., 2020).

Karbonatlaşma büzülmesi; temel olarak atmosfer CO₂'inin uygun bağıl nem şartlarında Ca(OH)₂ reaksiyonu sonucu CaCO₃ ve H₂O ve yine C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) reaksiyonları sonucu CaCO₃, SiO₂ ve H₂O karbonasyon ürünlerinin oluşumu söz konusudur (Houst, 1997). Söz konusu süreçler nedeniyle ortaya çıkan hacim azalışı karbonatlaşma büzülmesi olarak adlandırılmaktadır.

2.3.2. Rötreyi etkileyen faktörler

Çimento ve suyun hidratasyonu ve kuruma nedenleriyle betonun büzülmesinin tümüyle önlenmesi mümkün görünmemektedir. Özellikle köpük beton üzerinde yüksek etkisi ile kullanımını güçleştirmektedir. Pek çok bilgiye ve büzülme olgusunun tam olarak anlaşılamamasına rağmen çatlama riskine karşı büzülme potansiyelinin gözardı edilmesi mümkün görünmemektedir. Dolayısıyla  imento modifikasyonu, katkı ve lif kullanımı, uygun karışım tasarımı, i  kürleme yöntemleri gibi büzülme azaltma yöntemleri değerlendirilmektedir. Bunun için erken ve sonraki yaşlar olarak iki aşamada gerçekleşen beton büzülmesinde çoğunlukla otojen ve kuruma büzülmesine odaklanıldı ı gözlenmektedir (Holt ve Leivo, 2004; Kovler ve

Zhutovsky, 2006; Mao vd., 2021). Beton r tresini etkileyen faktörleri genel olarak harç bileşimi, kürleme,  evre koşulları ile harç döküm boyutları ve yüzey alanı büyüklüğü olarak sıralamak mümkündür (Yatağan, 2010).

2.3.2.1. Harç bileşimi

Agrega  zellikleri; agrega türü, büyüklüğü ve ağırlığı rötre üzerinde etkilidir. Temel olarak iri agrega içeriğinin artması belirli bir yaşta otojen ve kuruma r tresini azaltmaktadır. Agregatipinin büzülme davranışı üzerine etkisi oldukça geniş bir aralıktadeğişmektedir. Nitekim hafif agreganın gözenekli yapısı nedeniyle bir kısım suyun emilmesi ve kısmen depolanması sonrasında kürlenme döneminde nem sağlama avantajı söz konusudur. Hafif agregar tre özelliklerini geliştirir ve otojen ve kuruma büzülmesinin azalmasında etkilidir. İnşaat yıkım atıkları ya da geri dönüştürülmüş agregakullanımı kuruma büzülmesini artırmakta ve agregabileşimi boyutuna göre daha etkili olmaktadır. Hafif beton üretiminde yaygın olarak kullanılan polistren agregaların daha yüksek r treye yol açtığı ve kaya ve taşlardan üretilen diğer agregat rleri için (kuvarsit, şeyl, kireçtaşı, granit vd) beton rötre özelliklerinin durum ve boyutlara göre değiştiğ  belirtilmektedir (Elzokra vd., 2020).

Çimento  zellikleri ve harcın su- imento oranı; kullanım alanları ve üretim teknolojileri temelinde çok sayıda farklı beton türleri söz konusudur. Elzokra vd. (2020) tarafından katkılı düz beton, kendiliğinden yerleşen beton, yüksek mukavemetli beton, elyaf takviyeli beton süper emici polimer beton, geopolimer beton ve geri dönüştürülmüş polimerler ve kau uklu beton şeklinde değerlendirilen türler de dahil tüm beton türlerinde farklı tasarım bileşenleri ve karışım oranlarına bağlı olarak büzülme aşama ve dereceleri de değişebilmektedir. Har ta kullanılan  imento türü (bileşimi ve inceliğ ) ve oranı büzülme ve diğer özellikleri etkilemektedir. Yüksek fırın cürufu çimentolarının daha yüksek büzülme değerleri vermesine rağmen portland  imentosu yerine kullanılabildiğ , daha geç priz süresi ve daha yavaş bir sertlik gelişimi göstermesi nedeniyle Portland  imento karışımlarına göre daha yüksek gerilmelere maruz kalmadığı değerlendirilmektedir (Lura vd., 2001). Hidratasyonun durmasına değin devam eden otojen büzülme özellikle düşük su/ imento oranlarında ve yüksek  imento içeriklerinde etkilidir (Piasta ve Zarzycki, 2017). Sabit bir su/ imento (0.3) için düşük  imento sınıfına giren CEM II A-L 42,5

R'nin CEM I 52,5 R'ye göre daha iyi bir mekanik davranış sergilemesinin nedeni hidrasyon derecesi farklılığı ile ilişkilendirilmiştir (Falliano vd., 2018).

Mineral ve kimyasal katkıları; beton özelliklerini iyileştirmek amacıyla farklı tür mineral ve kimyasal katkı kullanımı oldukça yaygındır. Fazla su kullanımı gerektiren katkıların genellikle büzülme hızını artırdığı bilinmektedir. Mineral katkıları (uçucu kül, silid dumanı, metakaolin vd) çoğunlukla harç su içeriğini düzenleme kimyasal katkıları ise sıcaklığın düştüğü aşamada genleşme oluşturarak termal büzülme hızını karşılama, süper emici polimerlerin kullanımıyla otojen büzülme hızını azaltma, nişasta bazlı malzemelerle betonun hidrasyon ısı hızını düşürme etkinliği göstermektedir (Liu vd., 2019). Permeabilite azaltıcı bazı katkıların kuruma-büzülme davranışı açısından daha üstün performans gösterdiği bildirilmektedir (Nematzadeh vd., 2021).

Kürleme; betonda rötre kürleme şartları (yöntemi, sıcaklığı ve süresine) bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Sulama ile kürleme en çok tercih edilen uygulama olarak bilinmektedir. Ancak diğer kürleme yöntemleri arasında buhar (Alnkaa, 2018), polietilen örtü, ıslak çuval bezi, akrilik esaslı, su bazlı veya bitüm esaslı veya kömür katranı epoksi gibi farklı kür malzemelerinin de (Maslehuddin, 2013) kullanılabilirliği söz konusudur. Yine yüksek dayanımlı betonda içten kürlemede kullanılan akrilamid/akrilik asit kopolimerinin düşük w/c oranında otojenik büzülme hızını azaltmak için kullanılabileceği bildirilmiştir (Shen vd., 2016).

Çevre şartları; yüksek sıcaklık, düşük nem ve yüksek rüzgâr hızı faktörlerinin bireysel ya da kombinasyonlarının suyun hızlı buharlaşmasına yol açması betonun büzülmesine ve oluşan gerilmelerin betonun çekme dayanımından büyük olması durumunda çatlamasına neden olur (Almusallam, 2001). Sahada hava sıcaklığı ve bağıl nemin sabit olmaması, yağış ve yeraltı suyu gibi diğer su kaynaklarının beton nem şartlarını etkilemesi ve yukarıda sayılan nedenlerle beton deformasyonunun termal ve nem ile ilgili bileşenlerinin belirlenmesinin oldukça güç olduğu belirtilmektedir (Mateos vd., 2019).

Harç döküm boyutları-yüzey alanı büyüklüğü; yüzey alanı/hacim oranının artışı suyun buharlaşma yolu ile kaybının yükselmesine yol açar. Bu durum hızlı kurumaya ve rötrenin fazlalaşmasına neden olur. Yapısal elemanın nihai kuruma büzülmesinin,

aynı harç bileşimine sahip minyatür numunedeki büzülme gelişmesinden tahmin edilebileceği belirtilmektedir (Almudaiheem ve Hansen, 1987). Hansen ve Mattock (1996)'a göre silindirik ve I-şekilli farklı boyutlardaki numunelerde daha büyük hacim/yüzey oranlarına sahip olanlar için daha küçük ve daha yavaş kuruma büzülmesi söz konusudur (Sun vd., 2022).

2.4. Binalarda Isı Yalıtımı

İnsan yaşam süresinin çok büyük bir bölümü kapalı mekanlarda ve/veya binalarda geçmektedir. Temel ihtiyaçları doğrudan ya da dolaylı olarak karşılayan bu yapıların termal özellikleri, üretim malzeme ve teknolojilerine bağlı olarak değişmektedir. Yenilenebilir enerji üretiminin artmasıyla birlikte dolaylı da olsa bunun çevre üzerindeki etkisini azaltmanın en iyi yolunun enerji verimliliğinin artırılması olduğu ve bu şekilde tasarruf edilen enerjinin en ucuz enerji olduğu değerlendirilmektedir (Dylewski, ve Adamczyk, 2016).

Lemmet (2006)'e göre küresel enerjinin en büyük tüketicisi durumunda bulunan inşaat sektörüyle ilgili olarak 2010/31/AB sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konsey Direktifi neredeyse sıfır enerji tüketimi ve enerjinin büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklardan sağlanması gereği kapsamlıdır (Hung Anh ve Pásztor, 2021). Dolayısıyla bir taraftan sürdürülebilir bir çevrenin sağlanması ve diğer taraftan enerji fiyatlarının giderek arttığı günümüzde, iklim şartları (sıcaklık, konveksiyonel akımlar ve nispi nem) özelinde yapı tasarımları çok daha büyük bir önem kazanmış durumdadır. Bu bağlamda tüm ülkelerin yenilenebilir enerji üretiminin, enerji verimliliğinin artırılması ve sera gazı emisyonlarının azaltılması kapsamlı projelere kapsamlı bir desteği söz konusudur.

2.4.1. Isı transferi mekanizmaları

Isı, moleküler hareketin yol açtığı bir enerji türüdür. Cisimler ya da ortamlar arasındaki sıcaklık farklılıklarının ortadan kalkması “ısı geçişi” ya da “ısı transferi” süreciyle gerçekleşmektedir. Söz konusu ısı transferi süreci iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıma (radyasyon) yollarıyla gerçekleşmektedir. (Cengel Y.A., 1998).

İletim; İletim, daha yüksek enerjili parçacıklardan aradaki etkileşim nedeniyle daha düşük enerjili parçacıklara enerji aktarımı olarak değerlendirilir. Duvarın iki yüzü arasındaki ısı transferi ya da bir ucundan ısıtılan telin diğer ucunun da bir süre sonra ısınması iletim sürecinin bir sonucudur.

Isı iletimi “Fourier Yasası” olarak bilinen ve birim zamanda bir tabaka boyunca gerçekleşen ısı akısının, sıcaklık farkının gradyanına oranı şeklinde tanımlanan eşitlikle ifade edilir.

$$Q_{iletim} = -kA \Delta T \Delta x \quad (2.1)$$

Eşitlikte; k, ısı iletim katsayısı (W/mK), A, yüzey kesit alanı (m²), Δx, malzemenin ısı geçiş tabaka kalınlığı (m) ve ΔT, sıcaklık farkıdır (°C, K). Isı geçişinin sıcaklığın azaldığı yöne doğru gerçekleştiğini belirtmek üzere eksi (-) işareti kullanılmaktadır.

Isı iletimi belirlemelerinde kullanılan ısı iletim katsayısı, k; yapı elemanlarını oluşturan malzemelerin kendilerine özgü ısı iletim katsayılarının toplamı olarak alınmaktadır. Bu bağlamda yapı elemanı kesiti itibarıyla sıva, beton, yalıtım malzemesi, tahta vb. malzemelerin tabaka kalınlıkları ve ısı iletim katsayıları kullanılarak,

$$1/k = \delta_1/k_1 + \delta_2/k_2 + \delta_3/k_3 \text{ (W/mK)} \quad (2.2)$$

eşitliğinden gerekli ısı iletim katsayısı belirlenmektedir.

Taşınım; katı bir yüzey ile temas ettiği akışkan ortam arasındaki ısı geçişi olarak tanımlanan taşınım süreci; rastgele moleküler hareket (yayılım) ve akışkanın kitle hareketi olmak üzere 2 mekanizmayla gerçekleşmektedir. Akışkan türüne göre sınıflandırıldığında; sıcaklık değişimi kaynaklı yoğunluk farklılaşmasının yol açtığı ısınan havanın yükselmesi örneğinde olduğu gibi doğal taşınım (serbest konveksiyon) ve harici bir etkenin (fan, pompa veya atmosferik rüzgâr) neden olduğu zorlanmış taşınım (cebri konveksiyon) söz konusudur. Bazen doğal ve zorlanmış taşınım birlikte gerçekleşebilmektedir. Taşınım olayı Newton’un Soğutma Yasası eşitliği;

$$Q = h A \Delta T \quad (2.3)$$

ile tanımlanır. Eşitlikte; h , ısı taşınım katsayısı (W/m^2K), A , kesit alan (m^2), ΔT ise sıcaklık farkıdır (K). Isı geçiş katsayısı olarak da adlandırılan h 'ın, T 'den bağımsız olduğu varsayılır ve yüzey ortalaması alınır. $1/h$ oranı ise ısı taşınım direnci olarak değerlendirilir ve R sembolü ile gösterilir.

Işınım; ısı ışıma, birbirine temas etmeyen iki cisim arasında elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığı ile gerçekleşen ısı transfer şekli olarak değerlendirilmektedir. Işınım ile ısı geçişi diğer ısı taşınım yollarından farklı olarak boşlukta da gerçekleşmektedir. Tüm cisimler mutlak sıfır sıcaklığın ($-273.15\text{ }^{\circ}C$) üzerinde sıcaklığa sahip olmaları durumunda ısı ışıma yayırlar ve bunun seviyesi Stefan-Boltzmann Yasası ile belirlenir.

$$Q_{ışınım} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (2.4)$$

eşitliğinde; T , yüzeyin mutlak sıcaklığını (K), A , alanı (m^2) ve σ ise Stefan Boltzmann sabitini ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$) ve ϵ , nesnenin renk ve yüzey yapısına bağlı bir katsayıyı ($0 \leq \epsilon \leq 1$ ve siyah cisim için 1) ifade etmektedir. ϵ , açık renkli cisimlerde daha düşük değerler almakta ve gelen ışımanın tamamına yakını yansıtan cisimler beyaz cisim olarak tanımlanmaktadır. Yüzeye gelen toplam ışıma enerji dengesi; $\alpha + \rho + \tau = 1$ şeklinde belirtilir. Diğer bir deyimle yüzeyde yutulan (α), yansıyan (ρ) ve geçen (τ) ışıma oranları toplamı 1'e eşittir. Ek olarak bir cismin çok daha büyük bir yüzey tarafından çevrelendiği durumda ışıma;

$$Q_{ışınım} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{çevre}^4) \quad (2.5)$$

eşitliği aracılığı ile belirlenmektedir.

Bina geleneksel yalıtım malzemeleri için de enerji aktarım mekanizmaları; fiziksel temas durumunda iletim, malzeme boşluklarında taşınım ve elektromanyetik dalgaların emisyonu yani ışıma olarak değerlendirilir. Ancak günümüzde yüksek performanslı ısı yalıtım malzemeleri ve sistemlerinin geliştirilmesi çabalarının

başarıya ulaşmasında özellikle hava boşluklarında gerçekleşen taşınım ve ışıınım mekanizmalarına odaklanılması gereği söz konusudur.

2.4.2. Isı yalıtım malzemeleri

Bir yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik katsayısının küçüklüğü, ısı geçişine karşı daha dirençli olduğunun bir göstergesi olarak kullanılır ve ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletkenlik katsayısının (λ), <0.065 W/mK olması gerekmektedir. TS825 standardına özgü ısı iletkenlik değerleri, 23°C sıcaklık ve % 80 bağıl nem ortamında belirlenmiş olmalıdır (Yaman Ö., vd. 2015).

Binalarda yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemeleri arasında cam elyafı ve mineral yünü (taş ve cam yünü) gibi inorganik ya da doğal/biyo bazlı (kenevir, keten, jüt veya pirinç samanı gibi) bazlı ve polistiren, poliüretan, poliizosiyanürat gibi organik malzemeler de dahil olmak üzere lifli malzemeler yer almaktadır. Ek olarak bina kabuğu son uygulamaları arasında yüksek ısıl dirence sahip vakumlu yalıtım panelleri ve aerogel gibi yenilikçi malzemeler de sayılmaktadır.

Yalıtım malzemelerinin termal performansları temelde sıcaklık, nem içeriği ve kütle yoğunluğu ve ayrıca malzemenin niteliği ve mikroyapısı, gözenek gazları, kalınlık, yüzey hava akış hızı, basınç ve yaşlanma süresi gibi faktörlerin etkisi altında değer kazanmaktadır. Bir yalıtım malzemesinin termal performansında yoğunluk kritik öneme sahiptir. Kapalı hücreli malzemelerde yoğunluk artışının, daha küçük gözenekler ve hava hacmi oluşumuna ve dolayısıyla ısı akışının esas olarak katı parçacıkların termal iletimine bağlı kalmasına yol açtığı ve taşınım ve ışıınım yoluyla ısı transferinin önemsiz hale gelmesiyle termal iletkenliğin düşmesine neden olması söz konusudur. Açık hücreli malzemelerin ısı iletkenliği de yoğunluk arttıkça azalmakta ancak değişim genellikle kapalı hücreli malzemelerinkinden daha küçük olmaktadır (Hung Anh ve Pásztor, 2021). Yoğunluk dışında malzemenin sıcaklık ve nem içeriği ve formları da termal iletkenlik üzerinde etkilidir. Sıcak ve nemli ortamda malzeme içindeki ısı transferi, esas olarak su buharı difüzyonu, kapiler akış ve buharlaşma/yoğuşma etkisi altındadır. Genel olarak özellikle yüksek neme sahip bölgelerde nemin termal iletkenlik üzerine etkisinin sıcaklıktan daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir (Wang vd., 2022).

Basınç farkıyla oluşan ısı akımı ile aynı yönde hareket eden su buharı yapı elemanının gözeneklerinden geçerek dış ortama ulaşmaya çalışmaktadır. Ancak geçiş sırasında doygunluk ya da daha düşük sıcaklıktaki bir yüzeye temas buharın kısmi yoğunlaşmasına yol açar ve bu istenmeyen bir durumdur (Yaman Ö., vd, 2015).

Bir malzemenin durgun havaya göre hangi oranda su buharı geçişine direnç sağladığının ölçüsü olarak tanımlanan ve eşdeğer direnci gösteren hareketsiz hava tabakasının kalınlığı olarak değerlendirilen su buharı difüzyonu direnç faktörü;

$$S_d = \mu \times d \quad (2.6)$$

eşitliği ile elde edilir. Eşitlikte; μ , su buharı difüzyon direnç katsayısını (birimsiz) ve d , yapı malzemesi tabakasının kalınlığını (m) belirtir. 1500 m ve üzerinde S_d 'ne sahip yapı elemanlarının pratik olarak su buharı geçirmediği kabul edilir.

Organik ısı yalıtım malzemeleri inorganik olanlara göre genellikle daha düşük yoğunluk ($20-100 \text{ kg/m}^3$) ve ısı iletkenlik katsayılarına ($0.02- 0.04 \text{ W/mK}$), çok iyi süneklik ve su geçirmezlik özelliklerine sahip (Mattila, 2017) olmalarına karşın ısınma veya aleve maruz kalma sonrası kolayca büzüşme, zehirli gaz üretimi ve yanma özellikleri sergilerler. Dolayısıyla aynı anda düşük ısı iletkenlik, A sınıfı yangına dayanıklılık, yüksek dayanım, ekonomiklik özelliklerine sahip inorganik malzemeler, ısı yalıtım uygulamaları için önemli bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Arslan ve Aktaş, 2018).

Düşük yoğunluklu XPS ve EPS gibi malzemeler, çok iyi bir yalıtım sağlamasına rağmen yangına düşük dayanımları ve dolayısıyla yoğun duman oluşumuna yol açmaları nedeniyle daha az tercih edilir durumdadırlar. Ayrıca cam ve taş yünü malzemeleri yanmazlık özelliklerine sahip olsalar da uygulamada kullanılan yapıştırıcılar nedeniyle bu özelliklerini kaybetmektedirler (Arslan ve Aktaş, 2018).

2.5. Çalışma Özetleri

Hafif beton bloğun otoklavlama süresine göre dayanım gelişimi üzerine yapılan deneysel bir çalışmada (Kang vd., 2005) otoklavlama süresi ve lif içeriği artışıyla

basınç ve eğilme dayanımları artmıştır. Otoklavlama süresi değişiminin tobermorit üretimini durdurmamakla birlikte tobermoritin fazının değişmesine yol açtığı bildirilmiştir.

Ağırlıkça %75 kaolinit kil ve %25 Portland çimentosu ve %0.2- 8 aralığında değişen oranlarda köpürtücü ajan (alüminyum tozu) kullanımıyla üretilen otoklavlanmış hücresel betonda gözeneklilik ve mekanik dayanımın incelendiği bir çalışmada (Guglielmi vd., 2010); fazla hidrojen üretiminin yol açtığı gözenek birleşmesi nedeniyle daha düşük gözeneklilik ve dolayısıyla daha düşük mekanik dayanım (maksimum 0.62 MPa) daha yüksek alüminyum içeriği ile ilişkilendirilmiştir. Aynı bileşim ve gözeneklilik şartlarında otoklavlamanın mekanik dayanımda önemli artış sağladığı değerlendirilmiştir. Nitekim oda sıcaklığında kaolinit kil ve Portland çimentosu arası reaksiyonun çok yavaş gerçekleşmesi söz konusudur.

Shin vd. (2011) yerinde havada kürlenme süresi (5, 10, 15 saat) ve sıcaklığının (5, 10, 20 °C) hafif köpük beton özellikleri üzerine etkilerini belirlemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada kür sıcaklığının daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Sıcaklık ve süre artışının daha hızlı bir hidratasyona yol açtığı ve basınç dayanımını artırdığını ve verim gözetilerek yapılan değerlendirmede minimum kürlenme süresinin 5, 10 ve 20 °C için sırasıyla 15, 10 ve 5 saat olması gerektiğini bildirmişlerdir.

Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan köpük betonun; basınç silindiri dayanımı, basınç elastisite modülü, basınç gerilme-gerinme ilişkisi, maksimum basınç gerilmesinde gerinim, gözeneklilik, eğilme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerini belirlemek üzere yapılan deneysel ve analitik bir çalışmada (Mydin ve Wang, 2012); köpük beton mekanik özelliklerinin, normal ağırlıklı betona ilişkin mekanik özellik modellerinin kullanılması yoluyla tahmin edilebileceği değerlendirilmiştir. Bu kapsamda Balshin denkleminin hem ortam sıcaklığındaki basınç dayanımını hem de basınç elastisite modülünü hesaplamak için kullanılabileceği, yüksek sıcaklıklardaki basınç dayanımı için Eurocode 2 modelinin ve basınç elastikiyet modülü için ise Li ve Purkiss modelinin uygulanabileceği belirtilmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklıklardaki sertlik kaybının yaklaşık 90 °C'den sonra meydana geldiği ve bunun mikro çatlama nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir.

Davraz vd. (2016) tarafından, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, kalker tozu, polipropilen lifleri ve süper akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen 300 kg/m³ dozajlı ve su/katı oranı 0.30 olan köpük beton numunelerinin; kuru yoğunlukları 350- 1500 kg/m³, basınç dayanımları 1- 11 MPa, termal iletkenlik katsayıları 90- 500 mW/mK ve ultrasonik darbe hızları 1500- 2320 m/s arasında değiştiği ve aralarındaki güçlü ilişki temelinde termal iletkenliğin ultrasonik darbe hızı yöntemiyle kolay ve güvenilir bir şekilde tahmin edilebileceği bildirilmiştir.

Bileşiminde Lena nehir kumu (özellik yüzeyi, 220-240 m² /kg, ıslak öğütme ile elde edilen kum bulamacının kütle yoğunluğu, 1,6–1,7 kg/l) ve köpük ajanı FOAMSEM'e (70-80 g/l) yer verilerek hazırlanan 630–690 g/l ve 750–810 g/l yoğunluklarında hazırlanan D500 ve D600 sınıfı köpük betonlar için hidrotermel işlem sürecinde; ön kurlama 30 °C'de (D500 sınıfı ilk köpük beton için basınç dayanımı 0.26-0.28 MPa, D600 sınıfı köpük beton için 0.28-0.30 MPa) yapılmış ve sıcaklık (174–184 °C'ye kadar) ve basınç (0.8–0.9 MPa'ya kadar) artırılarak 8 saat süreyle otoklavda sertleşmesi sağlanmıştır. SEM analizinin, otoklavlama işleminden önce 0.291–1.15 mm boyutlarında küresel gözenekli bir yapı ve gözenekli yüzeyde 0.4-1.28 mm boyutlarında mikro çatlak ve kırıkların varlığını gösterdiği belirtilmiştir. Kalsiyum hidrosilikat fazlarının kristalimsi oluşumları, küresel kümelenmeleri yanında bağlayıcı hidrasyon ürünlerinin kuvars tanelerini kaplaması ve gözenekleri doldurması söz konusudur. Otoklavlamanın kristalimsi oluşumlarda homojen bir büyüme sağladığı ve tobermorit grubu düşük bazik kalsiyum hidrosilikatların kristalin tabaka benzeri hücreler şeklinde sürekli bir birikim göstermesine yol açtığı bildirilmiştir (Mestnikov, 2016).

Portland çimentosu, bitkisel protein köpürtücü ajan ve enerji santralinden uçucu kül ve uçucu kül agregası (FAC'ler) kullanılarak elde edilen köpük beton (500 kg/m³ ve 800 kg/m³) numunelerinin SEM, XRD ve diğer test yöntemleri aracılığı ile gözenek yapısı ve hidrasyon ürünleri incelenmiş, farklı kurlama yöntemlerinin (standart, doymuş Ca(OH)₂ çözeltisine daldırılma, su püskürtme ve hava) köpük betonun dayanım ve gözenek duvarı yoğunluğu üzerine etkileri araştırılmıştır (Hu vd., 2016). Nem düşüklüğünün, pekişmemiş yapıya neden olduğu belirtilmiş ve bağıl nemin basınç dayanımı üzerine önemli etkisinin düşük yoğunluklu köpük betonda

gözlemlendiğine işaret edilmiştir. Uçucu kül agregasının (FAC'ler) düşük yoğunluklu köpük beton dayanımının geliştirilmesinde daha etkili olduğu bildirilmiştir.

Hücreli betonun otoklavlanması fiziksel ve mekanik özellikleri etkilemekte ve performans özelliklerini farklılaştırmaktadır. Otoklavlama, uzun zaman hücreli betonun kürlenmesini hızlandıran bir yöntem olarak, uygun maliyetli ve dayanıklı ürünler üretmenin tek olası yolu olarak kabul edilmekle birlikte son zamanlarda üzerinde daha fazla yoğunlaşılacak yöntemin otoklavsız kürlenme olduğu gözlenmektedir. Keza otoklavlanmamış hücreli köpük beton dayanımının uzun kürlenme süresi boyunca arttığı belirtilmiş ve 3- 4 aylık kürlenme sonunda dayanımın 1.2 kat ve 2- 3 yıl sonra ise 28. gün dayanımına göre 2 kat veya daha fazla arttığına değinilmiştir. Otoklavsız kürlenme yapıyı destekleyici hidratların oluşmasını sağlarken otoklavlamanın silikat faz kristallerinin boyut olarak büyümesini ve kristaller arasındaki temas sayısını azaltması nedeniyle yapının bozulmasına ve dayanımın azalmasına yol açtığı belirtilmiştir (Vesova, 2016).

Duvarlar için prekast elemanlar geliştirmek üzere, kabuk olarak ultra yüksek performanslı beton ve çekirdek malzemesi olarak ise hafif agregalar ile gazlı köpük beton kombinasyonu üretimini amaçlayan çalışmada (Wetzel vd., 2016); köpük betonun basınç dayanımı ve ısı yalıtımı optimizasyonu için ultra yüksek performanslı beton konsepti, alüminyum tozu ya da macun kullanımı ve havalandırılma işlemi ile birleştirilmiştir. İyi bir dayanım eldesi için otoklavlamanın gerekli olmadığına işaret edilmiş ve 450 kg/m³'lük yoğunluğa sahip köpük betonun ~2 MPa'lık basınç dayanımının iyileştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca düşük w/b oranının sıradan gazlı otoklavlanmış betona kıyasla çok düşük bir kılcal gözeneklilik elde edilmesini sağlayabileceğine değinilmiştir.

Risdanareni vd. (2017) tarafından uçucu kül ve metakaolin kullanımına yer verilen hafif geopolimer betonda optimum köpürtücü ajan seviyesinin belirlenmesine yönelik çalışma kapsamında; köpürtücü ajan seviyeleri, bağlayıcı ağırlığının %0, 0.3, 0.6 ve 0.9'u olarak seçilmiş ve % 25 metakolin kullanılmıştır. Söz konusu betonda en iyi mekanik ve fiziksel özellikler uçucu külün % 25'inin metakaolin ile değiştirilmesiyle elde edilen % 0 köpük yüzdeli bileşimde gözlenmiştir. Yeterli mekanik ve fiziksel özellikleri sağladığı belirtilen kabul edilebilir seviye ise % 0.3

olarak belirtilmiştir. Köpürtücü ajan seviyesi artışının işlenebilirlik ve gözenekliliği artırdığına ve basınç ve çekme dayanımları ile elastisite modülünün azalmasına yol açtığı değerlendirilmiştir.

Kim vd. (2017) tarafından ekstrüzyon beton panel üretiminde atık beton tozunun, otoklav kürü sırasında SiO_2 kaynağı ve dolgu maddesi olarak görev yapan silika tozunun yerine kullanılmasının etkilerinin incelendiği çalışmada; ikame oranındaki artışın dayanım azalışına neden olmakla birlikte % 50 seviyesi için istenilen 14 MPa'lık dayanım gereksinimini karşıladığı bildirilmiştir. Atık beton tozunun daha yüksek yoğunluk ve absorpsiyon oranına yol açtığı ve otoklavla kürlemenin panellerin sağlamlığı yanında aynı zamanda yoğunluk, emme oranı ve değişim hızını etkilediği belirtilmiştir. Isıl iletkenlik ve yangına dayanıklılık yönüyle eşdeğer veya daha üstün özelliklerin kazanımının söz konusu olduğu ve dolayısıyla atık beton tozunun ekstrüzyon beton panel üretiminde silika tozunun yerini almak için yeterli potansiyele sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Köpük beton basit üretim teknolojisine rağmen gazlı otoklavlanmış betona kıyasla rötre ve düşük dayanım sorunu söz konusudur. Yoğun karıştırma teknolojisi ve modifiye mikro katkı kullanımı uygulamalarının yüksek performanslı köpük beton eldesi üzerine katkılarının ve dayanıklılığın temel bileşenleri olan yoğunluk, su emme, karbonizasyon ve donma direnci özellikleri üzerine etkilerinin değerlendirildiği bir çalışmada (Namsone vd., 2017); özellikle yağışlı ve soğuk iklim koşullarının göz önünde tutulması gerektiği ve dolayısıyla dayanım, su emme ve donma direncinin ön plana çıktığı belirtilmektedir. Ayrıca köpük betonun suya dayanımında puzolanik katkıların ve türbülans karıştırma teknolojisinin iyileşme sağlayacağına değinilmektedir.

Bartenjeva ve Mashkin (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada; protein ve sentetik köpük ajanlarına yer verilen otoklavlanmamış köpük beton üretiminde yüksek hızlı kavitasyon tipi köpük jeneratörü kullanılabilirliğinin belirlenmesine odaklanılmış ve bu kapsamda üretimin köpürtme ve dönme hızına bağlı olarak beton yoğunluk, dayanım özellikleri ile ısı iletkenliği değişimleri değerlendirilmiştir. Neopor köpük ajanı kullanımında D600 yoğunluk ve B2 sınıfı basınç dayanımı için köpürtme işleminin 10640-13210 dev/dak hızında 6 dakika sürdüğü belirlenmiştir. Isıl

iletkenlik değerlerinin standartları aşması nedeniyle ince taneli minerallerin ilavesinin değerlendirilebileceği belirtilmiştir. PB-2000 köpük ajanı ile 10640 dev/dak'lık 10 dakika süreli uygulamanın D700 yoğunluğunda B1.5 basınç dayanımına sahip köpük beton üretimini sağladığı gözlenmiştir. Aynı devirde ancak sürenin 8 dakika olarak azaltılması yoğunluğun D800 ve basınç dayanımının B2 ve ve 6 dakika için ise yoğunluğun D800 ve basınç dayanımının ise B3.5 olarak yükselmesine yol açtığı belirlenmiştir.

Polikarboksilik eter esaslı su azaltıcının yer verildiği bir çalışmada (Demir vd., 2017); söz konusu akışkanlaştırıcının aynı karışım ve akışkanlık değerleri için daha az su gereksinimine yol açtığı ve yine sülfonat polimeri esaslı ve alkali oranı yüksek olan süper akışkanlaştırıcılara göre benzer etkinin gözlendiği belirtilmiştir. Akışkanlığın taze harç yoğunluğundan etkilendiği ve ayrıca aynı karışıma ilişkin harç yoğunluğu azalışının aynı akışkanlık için daha fazla su gerektirdiği gözlenmiştir. Aynı akışkanlık seviyeleri için uçucu külün yer aldığı karışımlarda su ihtiyacının arttığı ve su/bağlayıcı oranı artışının mekanik özellikleri zayıflattığı bildirilmiştir.

Kılıçarslan vd. (2017) tarafından kireçtaşı agregası, pomza+kireçtaşı agregası ve pomza agregası kullanımına yer verilen bir çalışmada; çimento dozajı 300 kg/m³ ve w/s 0.30 olarak sabit tutulmuş ve karışımlara 80 g/l yoğunluğunda üretilen köpük ilaveleri gerçekleştirilmiştir. Farklı yoğunluklara (400, 450 ve 500 kg/m³) sahip köpük beton numuneleri için kuru yoğunluk- basınç dayanımı ve kuru yoğunluk- ısı iletkenlik katsayısı arasında güçlü ilişkilerin belirlendiği ve ayrıca basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısı iletkenliği özelliklerinin pomza oranından etkilendiği ve aralarında doğrusal ilişkilerin bulunduğu bildirilmiştir.

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, perlit, 10 M NaOH ve sodyum silikat çözeltileri karışımı alkali aktivatör çözeltisi, köpürtücü ajan H₂O₂ (%50) ve köpük stabilizatörü ve kıyılmış kısa polipropilen lif katkılarına yer verilen ve 60°C'de 24 saat kürlenен köpük beton numuneleri için elde edilen sonuçlara göre; köpük stabilizatörünün gözenek boyutunda azalmaya yol açtığı belirtilmiştir. Genişletilmiş perlit tanecikleri ile geopolimer köpük matrisi arasında çok iyi bir bağlanma gerçekleştiği ve çatlama eğiliminin azaldığı gözlenmiştir. Yüksek kütleme sıcaklığının çatlamaya neden

olduğu ve sıcaklık seçiminin doğru yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarının gereksinimleri karşıladığı lif ilavesinin rötre çatlaklarının oluşumunu engellediği bildirilmiştir (Başpınar ve Kurtuluş, 2018)

Düşük maliyetli hafif köpük beton blok üretiminde katı atıkların kullanımına yer veren Tan vd. (2018); düşük klinkerli çimento ve uçucu kül, karbür cüruf ile granüle yüksek fırın cürufu için optimum oranları sırasıyla %10, %58,5 %20 ve %10 olarak belirlemişler ve ayrıca %1,5 alçıtaşı ilave etmişlerdir. Optimum otoklavlı kürleme rejiminin; 4 saat 180°C sabit sıcaklık ve 4 saat doğal soğutma şeklinde olduğu belirtilmiş ve yoğunluğun 616,9 kg/m³ olduğu durumdaki basınç dayanımının 3,55 MPa'ya ulaştığını bulmuşlardır. Uçucu külün kısmi ikamesinde granüle yüksek fırın cürufu kullanılması gerektiği, bunun başlangıç dayanımını artıracak ve ön kürleme süresini kısaltacağını belirtmişlerdir. Köpük beton üretiminde çimento yerine uçucu kül, karbür cürufu ve düşük klinkerli çimento kullanımıyla istenilen mekanik dayanım ve yoğunluğun elde edilebileceğine işaret etmişlerdir.

Mashkin ve Bartenjeva (2018) tarafından otoklavlanmamış köpük betonun kalitesini iyileştirme amacıyla lifli katkı maddelerinin kullanılmasına yer verilen çalışmada; bazalt ve cam elyafı, volastonit ve diyopsit ince materyallerinin köpük beton karışımı agrega stabilitesini artırması nedeniyle yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısını azalttığı belirtilmiştir. Volastonit ve diyopsit katkı maddelerinin klinker minerallerine olan afiniteleri nedeniyle elyafa kıyasla yapıda daha iyi yapışma sağladığına değinilmiş ve diğer taraftan artan hava sürüklenmesi, optimum gözeneklilik oluşumu ve daha iyi hidratasyon gibi nedenlerle beton kalitesinin iyileşmesini sağladığı değerlendirilmiştir. Nitekim söz konusu mineral katkı maddeleri için plastik büzülmede % 15.6-20.8 ve kuruma büzülmesinde ise % 23-35'lik azalış olduğu gözlenmiştir.

Kilincarslan vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada; hafif agrega olarak Isparta, Kayseri, Nevşehir ve Karaman pomzalarının ve 90 g/L yoğunlukta üretilen protein bazlı köpüğün kullanıldığı köpük beton numuneleri ile hafif agrega yerine kireçtaşı tozu ($\leq 40 \mu\text{m}$) kullanımına yer verilen köpük beton numunelerinde w/c oranı 0.45 olarak seçilmiştir. En yüksek basınç dayanımı Nevşehir pomzası ve en yüksek termal iletkenlik ise kireçtaşı tozu katkılı köpük betonlar için belirlenmiştir. En düşük kuru

yoğunluğa (463 kg/m³) sahip Karaman pomzası katkılı köpük betonun en düşük termal iletkenliğe (0.125 mW/mK) sahip olduğu bulunmuştur.

Uçucu kül içeren ve uçucu kül içermeyen köpük betonların mekanik özellikleri ile donma ve çözülme döngülerinin basınç dayanımına etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada (Kozłowski ve Kadela, 2018); karışım köpük içeriğinin karışım ve sertleşmiş beton yoğunluğunu etkilediği ve yoğunluğunun azalmasıyla basınç dayanımı, elastikiyet modülü ve eğilme dayanımı azalışının polinomial bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca aynı yoğunluklar için uçucu kül içeren karışımların basınç dayanımının % 20 daha düşük olduğu bulunmuştur. Yine 25 kez donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılan numunelerin yaklaşık % 15 daha düşük basınç dayanımı sergilediği bildirilmiştir.

Sentetik, bitkisel ve hayvansal tutkal/kan bazlı yüzey aktif maddelerin köpük beton özellikleri üzerine etkilerini araştırmayı amaçlayan Sun vd. (2018) tarafından 600 kg/m³ yoğunlukta üretilen köpük betonlarda basınç dayanımı, su emme, kuruma büzülmesi ve donma direncinin köpürtücü ajan türünden etkilendiği belirlenmiştir. Sentetik köpük ajanı diğer bitkisel ve hayvansal köpük ajanlarından daha etkili bulunmuştur. Nanoparçacıkla stabilize edilmiş olan sentetik köpük ajan kökenli köpük daha yüksek stabilite ve dayanıma sahiptir. Ayrıca su azaltıcı etkisi nedeniyle kullanıldığı harcın akışkanlığı en yüksektir. 28 günlük kürlenme sonundaki en düşük su emme ve en güçlü donma direnci yine söz konusu ajan türü için elde edilmiştir.

Mashkin vd. (2018) tarafından bazı mineral katkıların (volastonit ve diyopsit) otoklavlanmamış betonun ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik performansını belirlemeye yönelik bir çalışmada; en düşük yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin eklenen minimum katkı miktarı için elde edildiği belirtilmiştir. Mineral katkıların gözenekler arası bölmelerde takviye edici etkisinin özellikle maksimum katkı uygulamalarına ilişkin yoğunluğun yüksek değerlerinde (500-700 kg/m³) gözlenmesi söz konusudur. Yoğunluğunun azalmasında diopsit eklenmesinin volastonite göre daha büyük etkiye sahip olduğuna ve termal iletkenlik katsayısının volastonit için daha yüksek bulunduğuna işaret edilmiştir.

Köpük betonda köpük ajanı ile ikame edilen genleştirilmiş polistren atıklarının (200 ve 400 dm³/m³) büzülme ve beton dayanımı üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada; su/bağlayıcı oranı 0.45 olarak sabit tutulmuştur. Genleştirilmiş polistren atık katkısı artışının, genleşme oranları ve büzülme oranlarında birbirleriyle uyumlu değişimlere ayrıca basınç dayanımlarında artışa yol açtığı belirlenmiştir. İkame daha üniform bir boşluk yapısı oluşmasını sağlarken büzülme oranını artırmış ulaşılan en yüksek basınç dayanım değeri 11.4 MPa olarak bulunmuştur. Artan ısı iletimi için belirlenen en yüksek değerin 0.0963 W/mK olduğu belirtilmiştir.

He vd. (2019) tarafından sodyum a-olefin sülfonat, sodyum dodesil sülfat ve sodyum alkol eter sülfat olmak üzere 3 farklı köpük ajanının alkali-aktif cüruf köpük beton özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Köpük özelliklerinde minimal farklılıklar gözlenmiş ve en iyi köpük stabilitesi sodyum a-olefin sülfonat için elde edilmiştir. Sodyum alkol eter sülfat için etkin köpük oranı, köpük içeriği artışıyla bariz bir şekilde azalırken diğerleri için küçük bir düşüş belirlenmiş ve sodyum alkol eter sülfat ve sodyum dodesil sülfat için köpük içeriğinin uygun şekilde artırılmasının yoğunluğu azaltabileceği değerlendirilmiştir. Sodyum a-olefin sülfonat kullanılan köpük beton yoğunluk ve basınç dayanımının en yüksek olduğu bulunmuştur. Alkali-aktif cüruf köpük beton köpük beton için sodyum a-olefin sülfonat'ın tercih edilebileceği değerlendirilmiştir.

Bambu ile güçlendirilmiş otoklavlanmamış köpük beton kirişlerin dayanım ve eğilme davranışlarının incelendiği bir çalışmada (Demchyna vd., 2019); düşük seviyede bambu takviyesinin köpük-beton kirişlerin erken tahribatına yol açabileceği belirtilmiş, köpük-beton yoğunluğunun 800 kg/m³ den 1200 kg/m³'e artışının beton ve bambu donatı iş birliğini etkilediği ve kirişlerin taşıma kapasitesinin 2.57 rijitliğinin ise 2.93 kat arttığı bulunmuştur. Bambu takviyesinin düşük maliyet, düşük ısı iletkenlik ve yüksek dayanım performansı gözetilerek çelik takviye ile rekabet edebileceği değerlendirilmiştir.

Otoklavlanmış gaz beton için bazı alternatif malzemelerin kullanımı oldukça yaygın olmakla birlikte bileşimi ve üretimine ilişkin ayrıntılı bilgi ve yine hidrotermal sertleşme öncesi malzeme davranışına ilişkin veri yetersizliği söz konusu olduğunu değerlendiren Strauba vd. (2019); yaptıkları çalışma sonucunda su/toz oranı ve

köpürtücü madde miktarının nihai ürün üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Ham yoğunluk, basınç dayanımı ve termal iletkenlik özelliklerinde su/toz oranı ve köpürtücü madde miktarı ile ters orantılı bir etkileşim söz konusudur. Ayrıca su/toz oranı düşüklüğünün (<0.525) akışkanlığı etkilediği ve düzgün bir gözenek yapısı elde edilemediği, yüksekliğinin ise (> 0.725) hidrotermal sertleşme sırasında malzeme bozunumuna neden olduğu bildirilmiştir.

Köpük betonun ortalama yoğunluğu ve dolgu tipi ısı iletkenlik katsayısını etkilemektedir. Geleneksel yöntemle hazırlanan ve bileşenlerini Portland çimentosu, mikrosilika, hiperplastikleştirici, su ve köpük ajanının oluşturduğu, 400, 600 ve 800 kg/m³ ortalama yoğunluğa sahip otoklavlanmamış köpük beton numunelerinde ortalama yoğunluk ve nem içeriğinin termal iletkenlik katsayısı üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Baranova ve Ryabkov, 2019); doğal nemli numunelerin kurutulmuş olanlara göre yaklaşık iki kat daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğu ve mikrosilika bazlı otoklavlanmamış köpük beton ortalama yoğunluğunun 800'den 400 kg/m³'e düşmesiyle ısı iletkenlikte % 44.9'luk bir düşüş gerçekleştiği belirtilmiştir.

Farklı köpük içeriği (% 0, 31 ve 47) ve uçucu kül ve silis dumanı (% 0, 10 ve 20 çimento ikamesi) kullanılarak hazırlanarak farklı kür rejimlerine (7 ve 28 günlük standart su kürü ve otoklav kürü) maruz bırakılan köpük betonların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırarak Gökçe vd. (2019); değişen etüv kurusu yoğunluklarda su emmelerin % 3.5- 35.9, basınç dayanımlarının 1.5- 88.1MPa ve ısı iletkenliklerinin ise 0.239- 0.942 W/m.K aralıklarında değiştiğini bulmuşlardır. Optimum sonuçlara en yakın değeri %10 silis dumanı içeren numunelerde elde etmişlerdir. Sonuç olarak yüksek köpük içeriğine sahip köpük betonun istenilen özelliklerde elde edebilmesi için üçlü çimentolu (silis dumanı+uçucu kül+çimento) sistemlerin kullanılmasını tavsiye etmektedirler.

Süper akışkanlaştırıcı (SR 5000F) organik-mineral katkı maddesi ve bazı aktif mineral katkı maddelerinin (uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silika dumanı SF-90) köpük beton özellikleri üzerine birleşik etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Kim vd., 2019); basınç dayanımlarının 13.91- 26.87 MPa ve eğilme dayanımlarının ise 3.25- 5.08 MPa değiştiği belirlenmiştir. Köpük beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımlarında, %8, 18, 78 ve 93 ve eğilme dayanımlarında ise % 6, 19, 50

ve 56'lık artışların kaydedildiği ve dolayısıyla organik-mineral katkı maddesinin basınç ve eğilme dayanımlarının sırasıyla % 8'den % 93'e ve % 6'dan % 56'ya yükselmesine yol açtığı bildirilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı arasındaki korelasyonlar $f_{cs} = 2.076 \cdot (f_{fs})^{1.568}$ ($R^2 = 0.985$) olarak belirlenmiş ve yine basınç dayanımı ve kür süresi arasında ise 0.9'dan büyük korelasyon katsayısı bulunmuştur. Organik-mineral katkı maddesinin köpük beton özelliklerini başarılı bir şekilde geliştirdiği değerlendirilmesine yer verilmiştir.

Yapı dış mekanlarında etkili bir malzeme olarak kullanılabilirliği söz konusu olan otoklavlanmış köpük beton için ısı yalıtımlı duvar elemanlarının dayanım ve taşıma kapasitelerinin oldukça geniş bir aralıkta değiştiği ve dolgu miktarı ve dağılımıyla ilişkili olduğunu değerlendiren Posternak ve Posternak (2019), yapı-ısı-yalıtkan bir otoklav köpük-beton için model deneysel çalışmalarını, karışık değişkenlerle (bir bağımsız faktörün üç bileşenli bir diyagramın bir eksenini boyunca sürekli hareketini göstermek yoluyla) gerçekleştirmiştir. Bağımsız faktör olarak, dolgu miktarı %5, 10 ve 15'tir ve üç karışım faktörü 200, 400 ve 600 m²/kg'lık dispersiyonu almışlar ve mineral dolgu miktarı ve köpük beton dayanımı ilişkisi kapsamında önerilen polinomial fonksiyonların köpük betonun potansiyel özelliklerinin daha iyi tanımlanabilmesi için geniş bir değişim aralığı sunduğuna işaret etmişlerdir.

Yoğunlukları 600- 1400 kg/m³ arasında değişen ve farklı hacimlerde bir organik köpük ajanı kullanılarak hazırlanan köpük beton numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada (Ben Youssef, 2020) artan makro gözenekliliğinin mekanik özelliklerde gerilemeye yol açtığı doğrulanmıştır. Mekanik özelliklerin makro gözeneklilikten tahminine yönelik analitik modellerin değerlendirilmesi; Balshin tipi güç yasaları ile Young modülünün ve köpük betonun basınç dayanımının makro gözeneklilikten başarılı bir şekilde tahmin edilebileceğini gösterdiği belirtilmiştir.

Uçucu kül, silis dumanı ve polipropilen lif eklemeleriyle geliştirilen 1000–1900 kg/m³ yoğunluğa ve yaklaşık 20–70 MPa basınç dayanımlarına sahip yapısal lifli köpük betonlar üzerinde yapılan incelemelerde; uçucu kül ilaveli köpük betonun 28 günlük dayanımının, üç ay sonrasının yaklaşık % 80-95 seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Belirli köpük hacmi için polipropilen lif ve silis dumanı

uygulamasının dayanımı % 20-50 artırdığı bulunmuştur. Benzer karışım oranları için köpük hacmi ile büzülmenin arttığı ve polipropilen lifin büzülme direncini iyileştirdiği belirtilmiştir. Ayrıca, fırında kurutma sıcaklığının 30 °C'den 120 °C'ye artırılmasıyla beton ısı iletkenliğinin azaldığı bildirilmiştir (Amran vd., 2020).

Davraz vd. (2020) tarafından köpük beton üretiminde hafif agrega olarak pulverize kömür uçucu külünün (%0, 11, 22, 33 ve 44 çimento ikamesi) kullanılabilirliği 250 kg/m³ çimento dozajı ve 0.65 w/c şartlarında 100 mm küp ve 300x300x50 mm prizma numuneleri üzerinde araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan pulverize kömür uçucu külünün tane boyutu <2 mm ve incelik modülü 0.5 mm olarak belirtilmiştir. En yüksek oranda kullanılan pulverize kömür uçucu kül uygulaması için basınç dayanımının kontrol karışımına göre %44 azaldığı bulunmuştur. Yoğunluğu 452 kg/m³ olan köpük beton numunelerinin ortalama basınç dayanımı 1.07 MPa, ısı iletkenlik katsayısı ise 0.097 W/mK olarak bulunmuş ve söz konusu malzemenin prekast eleman ve hafif yer şapı üretiminde kullanılabileceği bildirilmiştir.

Köpük betonda basınç dayanımının Makine Öğrenimi algoritmaları yardımıyla tahmin edilebilirliği üzerine yürütülen bir çalışmada (Dao vd., 2020); 28 günlük basınç dayanımı tahmini için Yapay Sinir Ağı performansı değerlendirilmiştir. Model sonuçlarının yakınsamasının istatistiksel analizinde Monte Carlo simülasyonları kullanılmış ve Model performansının doğrulanması için belirleme katsayısı, ortalama mutlak hata ve ortalama kare hata parametrelerine yer verilmiştir. Kuru yoğunluğun en yüksek etkiye sahip değişken olarak bulunduğu bildirilmiştir.

Li vd. (2021) tarafından mineral katkı maddesi atık kireç çamuru (LM) ve uçucu kül (FA) kullanılan düşük çimento içerikli köpük beton özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen bir çalışma kapsamında öncelikle basınç dayanımı temelinde söz konusu materyal oranlarının optimize edilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimize atık kireç çamuru/uçucu kül oranı (1/5) kapsamında söz konusu materyallerin farklı dozları için (% 0, 50, 60, 70 ve 80) farklı ıslak yoğunluklarda (600, 700, 800 ve 900 kg/m³) beton karışımları hazırlanmıştır. Köpük betonların 170- 190 mm akıcılığı ile mükemmel işlenebilirlik ve stabiliteye sahip olduğu belirtilmiş ve atık kireç çamurunun hidrasyonu artırması nedeniyle erken dayanımı yükselttiğine işaret edilmiştir. Ek olarak atık kireç çamuru ve uçucu kül içeriğinin azalmasının köpük

beton mekanik özelliklerinin iyileşmesini sağladığına değinilmiştir. Artan uygulama miktarının elastisite modülü ve CBR oranının yükselmesine yol açtığı gözlenmiştir. Basınç dayanımı ve ıslak yoğunluk arasındaki ilişkinin üstel bir fonksiyonla tanımlanabileceği ve yarma ve eğilme dayanımları ile basınç dayanımı arasında belirleme katsayıları (R^2) 0.95 üzerinde bulunan güçlü ilişkiler bulunmuştur. Köpük betonların tümü için basınç ve çekme dayanımı ile CBR değerlerinin minimum gereksinimlerin üzerinde olduğu değerlendirilmiştir.

Köpük ajan olarak farklı tür yüzey aktif maddelere (anyonik, katyonik, iyonik olmayan ve amfoterik) yer verilen ve bunların köpük betonun gözenek yapısı üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada; köpürtücü ajan ve çimento arasındaki etkileşimin köpük beton oluşum sürecinde daha büyük rol oynadığı ve reaksiyon büyüklüğüne bağlı olarak, hacim yoğunluğu ve gözenek duvarlarında etrenjit oluşum seviyesinin değiştiği belirtilmiştir. Katyonik veya iyonik olmayan yüzey aktif maddelerin köpük beton kütle yoğunluğunu azaltması ve yüksek oranda bağlantılı gözenek oluşumuna yol açması gibi nedenlerle düşük yoğunluklu yalıtkan köpük beton hazırlamada kullanımının uygun olmadığı bildirilmektedir (Hou vd., 2021).

Dış duvar yalıtımında kullanılmak üzere, nehir tortusu ve genişmiş polistiren partikülü içeren çevre dostu ve düşük karbonlu ultra hafif köpük betonun özelliklerinin incelendiği bir çalışmada; SEM görüntülerinin genişmiş polistiren partikülleri ve alkali ile aktiveleştirilmiş metakaolin-nehir tortu macunu arasındaki uyumluluğu doğruladığı ve bileşimde söz konusu materyallerin artmasıyla dayanımın azalmasına karşın benzer yoğunluğa sahip diğer yalıtım malzemelerine göre daha iyi bir performans sergilediği bildirilmiştir. (Shi vd., 2021).

Othman vd. (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada, kum-çimento oranı, su-çimento oranı, köpük dozajı ve seyreltme oranının köpük beton numunesinin işlenebilirliği, yoğunluğu ve basınç dayanımı üzerine etkilerine ilişkin aşamalı testler sonrasında kısmi çimento değişimi olarak işlenmiş kullanılmış ağartma toprağının optimum içeriği belirlenmiştir. İşlenmiş kullanılmış ağartma toprağının kullanım oranındaki artışın köpük beton yoğunluğunu azalttığı ve basınç dayanımının ise oranın %30'a kadar artmasıyla arttığı ve sonrasında azaldığı bulunmuştur. Nitekim % 30 oranı için, işlenebilirlik özellikleri yanında istenen 1600 kg/m^3 yoğunluğun

sağlandığı ve basınç dayanımının 10 MPa'dan 23 MPa'ya yükseldiği belirlenmiştir. Dolayısıyla söz konusu köpük betonun yapısal taşıma yükü dayanım gereksinimini karşıladığı ve inşaat uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip olduğu değerlendirilmiştir.

Xi vd. (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada yoğunluğu 180- 1800 kg/m³ değişen düz ve uçucu kül ve genleşmiş polistiren içeren köpük betonların basınç ve termal özellikleri incelenmiş ve düz beton için 180, 325, 450 ve 595 kg/m³'lük yoğunluk seviyelerinde basınç dayanımı ve 300, 600 ve 900 °C'lik sıcaklık seviyelerinde yangın dirençleri değerlendirilmiştir. Köpük hacmi daha fazla olan beton için yoğunluk azalışının betonun akışkanlığı ve dayanımın azalmasına neden olduğu ve basınç altında enerji emme kapasitesinin de benzer bir eğilim sergilediği belirlenmiştir. Yoğunluk artışının köpük beton ısı iletkenliğinin düz çimento betona göre %11-100'lük artışlarla 0.13'ten 1.12 W/m·K'ye yükseldiği bulunmuştur. Çimento ağırlığının % 54'üne kadar uçucu kül ya da toplam hacmin %90'ına kadar genleşmiş polistiren ilavelerinin ısı iletkenlik üzerine etkilerinin oldukça düşük olduğu değerlendirilmiştir.

Abd Elrahman vd. (2021) tarafından bir ultra hafif köpük betonda (350 kg/m³ fırın kuru yoğunluk) nanosilika uygulanabilirliğini ve çimento ikame malzemeleri olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanımının etkilerini belirlemek üzere yapılan çalışmada; nanosilika eklenmesinin taze durumdaki köpük beton homojenliğini iyileştirdiği, erken yaşta daha yüksek olan kuruma büzülmesinin 28. günde azalmasını sağladığı ve gözenekleri daraltması, boyutlarını küçültmesi ve köpük kabarcıklarının birleşmesini engellemesi nedenleriyle toplam gözeneklilik ve sorpsiyonun azalmasına yol açtığı belirtilmiştir. Ek olarak nanosilikanın % 5 ve 10 seviyesinde çimento ile ikame edilmesinin, köpük beton basınç dayanımında % 20 ve % 25 seviyelerinde iyileşme sağladığı bulunmuştur. Ayrıca Mikro-CT ve SEM verilerinin nanosilikanın köpük kabarcıkları arasındaki duvar kalınlığını arttırdığı ve daha yoğun bir katı yapı oluşumunu sağladığını gösterdiği bildirilmiştir.

Aktif tektonik alanlarda derin tünel kaplama yapısı için uygulanabilirliği araştırılmak üzere farklı yoğunluklara (300, 600, 900, 1200 ve 1400 kg/m³) sahip köpük betonların split-Hopkinson basınçlı çubuk testlerinin gerçekleştirildiği bir çalışmada

(Ma vd., 2022); Köpük beton tepe gerilmelerinin gerinim oranı ile doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu, dinamik stres-gerinim eğrisi belirgin dalgalanma özellikleri sergilediği ve aynı yoğunluk seviyesinde enerji absorpsiyon oranının önce artış sonra azalış şeklinde bir değişim gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca yoğunluğu yüksek köpük betonda gözeneklerin genişlemesi ve yeni çatlakları nedeniyle enerji emiliminin değiştiği gözlenmiştir.

Çevrenin korunması ve sürdürülebilir kalkınma odaklı doğal taş işleme fabrikalarının ürettiği atıkların değerlendirilmesi amaçlı bir çalışmada (Ahmadi vd., 2022); köpük beton agregası ince kum yerine kullanılan granit atıklarının yoğunluğu 1400-2000 kg/m³ olan köpük betonda basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, ısı iletkenlik ve mikro yapı özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. SEM görüntülerinin çimento hamuru benzerliğini ve basınç dayanımındaki küçük farklılıkları açıklar nitelikte olduğu, ince kum yerine granit atığının kullanılmasının basınç ve eğilme dayanımlarında sırasıyla % 3.9–9.9 ve % 4.3–9.8 oranında artışa neden olduğu ve aynı yoğunluklar için termal iletkenliklerde benzerlik bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca yaşam döngüsü değerlendirme analiz verilerine göre uygulamanın abiyotik tükenme, küresel ısınma, asitleşme, ötrofikasyon ve fotokimyasal oksitlenme endekslerini olumlu yönde etkilediği bildirilmiştir.

Taylor (1992)'a göre sıcaklık artışı köpük betonun fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenlerinde değişime neden olur. Suyun artan buharlaşma kaybı yoğunluk azalışıyla sonuçlanmaktadır. 90-170°C sıcaklıklarda serbest ve kısmen kimyasal olarak bağlı su kaybı söz konusudur. 120-140°C arasında hidratlı kalsiyum silikat (C-S-H) jelinin ayrışması ve 120°C'de etrenjitin bozulması kimyasal olarak bağlı suyun kısmi kaybına yol açmaktadır. 200-300°C sıcaklıklarda ise C-S-H jeli ve sülfalüminat fazlarının daha fazla ayrışması kimyasal olarak bağlı suyun da salınımına neden olmaktadır. 600 kg/m³ yoğunluğa sahip köpük betonun farklı sıcaklık (25, 100, 200 ve 300°C) ve çevre basıncı (0, 0.3, 0.5 ve 0.8 MPa) şartlarında üç eksenli döngüsel sıkıştırma testlerine maruz bırakılarak kırılma modları, gerilme-gerinim eğrileri, basınç dayanımı, artık dayanımı, elastik modül ve kırılgeçirgenlik indeksi parametreleri incelenmiştir. Köpük beton basınç dayanımı, artık dayanımı ve elastik modülünün basıncın artmasıyla arttığı ve sıcaklığın yükselmesiyle azaldığı belirlenmiştir (Feng vd., 2022).

Büyük çoğunlukla boşluklu beton tuğla çimento, su, kum ve çakıl bileşenleri ve çakıl hariç tutulursa otoklavlanmış gaz beton ilave olarak alüminyum tozu, kalsine alçı ve kireç ve köpük beton ise köpük ajanı içermektedir. Otoklavlanmış gaz beton boşluklu beton tuğlaya göre küçük ve üniform, köpük betona göre bağlantılı gözenek yapısı farklılıkları sergilemektedir. Gözenek yapısı farklılıkları nedeniyle söz konusu beton türlerinin darbe davranışlarını araştıran (Liu vd., 2022); otoklavlanmış gaz beton ve köpük beton zirve darbe gerilimi/basınç dayanımı oranının yaklaşık 0.6 olarak daha yüksek bulunmasını küçük ve düzgün gözenek yapıları nedeniyle darbe yüküne karşı daha yüksek bir dirence sahip olmalarıyla açıklamaktadırlar. Ek olarak köpük beton zirve geriliminin otoklavlanmış gaz betona göre yaklaşık %36 daha yüksek olduğunu belirtmektedirler.

Yeni bir jeopolimer köpük beton için bağlayıcı olarak uçucu kül yerine palmiye yağı yakıt külü (%10, 20 ve 30) kullanımının etkisini araştırmak üzere köpüksüz ve köpüklü (Conplast F292) olarak hazırlanan numuneler üzerinde yapılan bir çalışmada (Alnahhal vd., 2022); temel mühendislik özellikleri ve XRD, SEM ve EDX aracılığı ile de mikroyapısal özellikler değerlendirilmiştir. Jeopolimer harcı palmiye yağı yakıt külü içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Kontrol karışımı için 36.6 MPa'lık basınç dayanım değeri, palmiye yağı yakıt külü içeren jeopolimer köpük beton uygulamaları içerisinde en yüksek (6.1 MPa) %20'lik uygulama seviyesinde belirlenmiş ve söz konusu uygulamanın jeopolimerizasyon jeli üretimi için gerekli silika ve alüminayı sağladığı bulunmuştur. SEM verilerinde basınç dayanım azalışına yol açan reaksiyona girmemiş uçucu kül parçacıklarının gözlemlendiği ve XRD sonuçlarının, köpük ilavesinin belirli tepe noktalarının yoğunluğunu etkilediğini gösterdiği bildirilmiştir.

Chen vd. (2022) tarafından, farklı kür sıcaklığı (değişken kürlenme sıcaklığı ve standart kürlenme sıcaklığı) şartlarının beton erken yaş dönemi ısı iletkenliğinde neden olduğu farklılıkları belirlemek üzere yapılan çalışmada; nem içeriğinin etkisini değerlendirmek üzere nemli ve kuru beton numuneleri kullanmışlardır. Değişken kürlenme sıcaklığı uygulamasında ısı iletkenlik kür yaşı ilişkisinin için nemli ve kuru numuneler için zıtlık gösterdiği belirlenmiştir. Ek olarak ısı iletkenliğin kürlenme sıcaklığı uygulamasıyla değiştiği bulunmuştur. SEM verilerine göre değişken kürlenme sıcaklığı uygulamasının daha yavaş hidrasyon hızı ve dolayısıyla

gözenek yapısı büyümesine yol açtığını değerlendirilmiş ve kürleme sıcaklığının termal iletkenlik gelişimini kontrol ettiğini bildirilmiştir.

Evsel katı atık yakma tozunun köpük betonun gözenek yapısı ve performansı üzerine etkilerini kuru yoğunluk, su-çimento oranı ve toz içeriği temelinde araştıran Dong vd. (2022), temelde w/c oranı değişimi kaynaklı kuru yoğunluk artışının, gözenekliliğin etkili bir şekilde azalmasına ve dolayısıyla su emilimini azaltırken geçirimsizlik ve basınç dayanımının iyileştirdiğini belirtmişlerdir. 500 kg/m³ kuru yoğunluk ve % 10 evsel katı atık yakma tozu içeriği ve w/c oranının 0.5 olduğu durumda en iyi geçirimsizlik kazanımı söz konusu olduğunu bulmuşlardır. Evsel katı atık yakma tozunun, köpük betonun genel gözenek boyutu dağılımında bariz bir değişikliğe neden olmamakla birlikte düşük hidratasyon aktivitesi ve kürlenme sırasında artan köpük patlaması ve daha fazla açık gözenek oluşumunun basınç dayanımının azalmasına yol açtığı değerlendirilmesine yer vermişlerdir.

Yapısal ve yapısal olmayan amaçlar için kullanılabilirliği yoğun olarak araştırılan çevre dostu bir malzeme biyoçarın ve kürleme şartlarının köpük beton kırılma enerjisi üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Falliano vd., 2022); kullanılabilirlik alanları gözetilerek iç bölmeler ya da bina kaplamaları için 800 kg/m³'ü ve yine yapısal amaçlar için 1600 kg/m³ yoğunlukları temel alınmış ve 20°C'ye eşit sıcaklıkta suda ve 20±3°C sıcaklık ve %70±5 bağıl nemde havada olmak üzere iki farklı kürleme yöntemi kullanılmıştır. Çimento ağırlığı temelinde %2 biyokömür ilavesinin, kırılma enerjisinde yaklaşık % 10'luk bir artışa neden olduğu artan uygulamanın ilave artışa yol açmadığı belirlenmiştir. Farklı kürleme şartlarının morfolojik ve mikroyapısal farklılıklara neden olduğu ve havada kürlemenin kırılma enerjisinde>% 235 ve eğilme dayanımında>%135 artışa yol açtığı bildirilmiştir.

Isı yalıtım malzemesi ultra hafif köpük betonun basınç dayanımı ve termal iletkenlik özellikleri üzerine hava-kuru yoğunluk (200-500 kg/m³), köpük ajanı (sentetik ve protein) ve bağlayıcı tipinin (Portland çimentosu, kalsiyum sülfat alüminat çimentosu, metakaolin, silisli uçucu kül, kalkerli uçucu kül) etkilerinin belirlenmesi amacıyla yürütülen bir çalışmada (Gołaszewski vd., 2022); basınç dayanımı ve termal iletkenliğin yoğunlukla ilişkisi değerlendirilmiş, protein esaslı köpürtücü ajanın daha iyi termo-mekanik özellikler kazanımı sağladığına işaret edilmiş, mekanik ve termal

davranışını iyileştirmesi nedeniyle kalsiyum sülfoalüminat çimentosunun sentetik köpürtücü ajanla köpük beton için kullanım potansiyelinin olduğu belirtilmiştir. Metakaolinin silisli uçucu kül veya kalkerli uçucu külle ikame edilmesiyle olumlu bir gelişme sağlanmamış ve sentetik köpük ajanı uygulamasında su kaybı daha yavaş ve düşük düzeyde gerçekleşmiştir.

Kireç çamuru ve uçucu kül (%0, 50, 60, 70 ve 80, w/w) ile ıslak yoğunluğun (600, 70, 800 ve 900 kg/m³) köpük betonda akışkanlık, basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, kuru-ıslak direnç, donma-çözülme direnci ve mikroyapı üzerine etkilerinin incelendiği bir çalışmada (Yuan vd., 2022).; ıslak yoğunluk artışı ya da kireç çamuru ve uçucu kül azalışının basınç dayanımı artırdığı ve dayanımın 1.31-2.52 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. Aynı etki %0.34-0.44 değişen kuruma büzülmesinde de gözlenmiştir. Artan kireç çamuru ve uçucu kül uygulaması, mikro dolgu etkileri ve puzolanik özellikleri nedeniyle köpük beton kuruma büzülmesini azaltmış ve %0 ve 50 dozları için %23'lük bir azalış kaydedilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Hammaddeler

Hammaddeler, rezerv alanlarından ya da üretici firmalardan sağlanmıştır.

3.1.1. Kireç

Köpük beton üretiminde bağlayıcılardan biri olarak Antalya’da bulunan Dirmil Kireç firmasından temin edilen sönmüş kireç kullanılmıştır.

3.1.2. Çimento

Köpük beton üretiminde ana bağlayıcı olarak Çimsa firması ürünü CEM-I-42.5 R tipi Portland çimento kullanılmıştır. Söz konusu çimentonun özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimsa Portland çimentosu özellikleri (Çimsa, 2021)

Klinkerin Kimyasal Özellikleri (%)		Çimentonun Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	18.90	Özgül Ağırlık	3,11 gr/cm ³
Al ₂ O ₃	5.15	Özgül Yüzey (Blaine)	3600-3900 cm ² /gr
Fe ₂ O ₃	3.36	Priz Başlangıcı	150-180 Dakika
CaO	63.59	Priz Sonu	190-220 Dakika
MgO	1.57	Su	%26-27
SO ₃	2.65	Hacim Sabitliği	1,0 mm
Na ₂ O+ K ₂ O	1.13	0,045 mm Elekte Kalıntı	%4-6
Çimento Mekanik Özellikleri			
2 Günlük Basınç Dayanımı		27-29 MPa	
28 Günlük Basınç Dayanımı		51-53 MPa	

3.1.3. Mikronize kuvars

Kuvars minerali oldukça saf silisyum dioksitten oluşur. Mohs sıkalasında sertliği 7 olan kuvars mineraline doğada oldukça çok miktarda rastlanmaktadır. Çalışmada kullanılan mikronize kuvars Aydın-Çine bölgesi kaynaklı ve <100 mikron inceliğindedir. Polat Maden firmasından temin edilmiştir.

3.1.4. Uçucu kül

Uçucu kül standardına (TS EN 450-1) göre, Pulverize kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan, puzzolanik özelliklere sahip ve bileşiminde yüksek oranda SiO_2 ve Al_2O_3 'ten içeren, reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az % 25 olan, büyük ölçüde küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Bu çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül malzemesi, Kütahya-Tavşanlı bölgesindeki Çelikler Tunçbilek termik santralinden elde edilmiştir.

3.1.5. Metakaolin

Metakaolin yüksek saflıktaki kaolin kilinin 600-800 °C sıcaklıkta kalsine edilmesiyle elde edilen puzolonik bir çimento ve beton katkı malzemesidir (BR llic vd. 2010). Çalışmada kullanılan metakaolin hammaddesi Hindistan'dan temin edilmiştir.

3.1.6. Amorf silika

Amorf silika malzemesi volkanik-hidrotermal sistemler içerisinde belirli bir sıcaklıkta ve çözünürlükte dengeye ulaşmış olan kolloidal yapıdaki silis partikülleri içeren akışkanların yer küreye çıktıktan sonra soğuması ve doygunluğa erişmesi sonrasında yüzeyde oluşan tortul bir kayaktır. Isparta-Keçiborlu kaynaklı, Davraz ve Gunduz (2005) tarafından belirlenmiş ve kullanılmış, laboratuvar tipi bilyalı (Şekil 3.1) değirmende sabit devir (45 d/dk) ve sürede (~5 saat) öğütülmüş bir materyaldir.



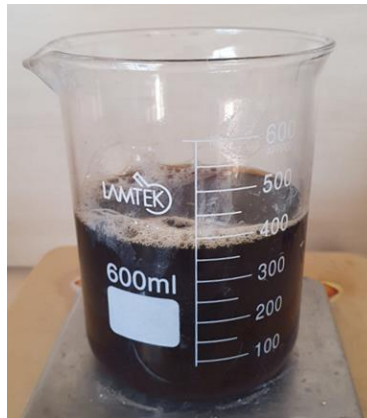
Şekil 3.1. Laboratuvar tipi bilyalı değirmen (SDÜ-DEYMAM)

3.1.7. Su

Çalışmada Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Araştırma Uygulama Merkezi musluk suyu kullanılmıştır.

3.1.8. Sentetik köpük ajanı

Kullanılan köpük ajanı için uzun raf ömrü ve ekonomikliği gözönünde tutularak sentetik olanı tercih edilmiştir. Sentetik köpük ajanı, Aydos Kimya San. ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiş Lightcon 28 isimli üründür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sentetik köpük ajanı (Lightcon 28)

Orijinal ambalajlı 5 kg'lık bidon halinde sağlanan ürünün yoğunluğu $1.03 \text{ kg/l} \pm 0.02$ ve pH değeri 5.0 ± 1 olarak belirtilmiştir. 250 ml ajana 5 lt su ilavesi sonrası hava ile sıkıştırılarak elde edilen köpüğün yoğunluğu, hacmi bilinen bir kap yardımı ile belirlenmiş ve her dökümde stabil yoğunlukta ($0.080 \pm 0.005 \text{ g/cm}^3$) kullanılmıştır.

3.2. Hammadde Analizleri

3.2.1. Özkütle

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerinin üretiminde kullanılan hammadde ve katkı maddelerinin (katı) özkütle değerleri SDU DEYMAM Laboratuvarında gaz piknometresi (Micromeritics Accupyc II 1340) kullanılarak (Şekil 3.3) ASTM D 5550-06 standardına göre belirlenmiştir. Ölçüm işlemlerinde 10 cm^3 'lük ölçü kabı kullanılmış, bir numune için 5 tekrar yapılmış ve ortalaması özkütle değeri olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Helyum Piknometresi (SDÜ-DEYMAM)

3.2.2. Kimyasal analizler

Çalışma kapsamında kullanılan hammaddelerin analiz sonuçları; CEM-I-42.5 R tipi çimento için Çimsa firması, mikronize kuvars için Polat Maden firması, metakaolin ve kireç için Afyon Kocatepe Üniversitesi Doğaltaş Laboratuvarı (AKU DAL), uçucu kül için S-Lab Standart Laboratuvar İşletmeciliği A.Ş., Lightcon 28 sentetik köpük ajanı için Aydos Kimya San. ve Tic. A.Ş. ve amorf silika için Davraz ve Gunduz (2005) çalışma verilerinden sağlanmıştır.

3.2.3. Özgöl yüzey alanı

Çalışma kapsamında kullanılan tüm malzemeler, özgöl yüzey alanlarının bilinmemesi nedeniyle SDÜ-DEYMAM'da Blaine testine tabi tutulmuştur. Blaine testi TS EN 196-6 standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Bu metot bilindiği üzere bir mukayese metodudur. Bu nedenle cihazın değeri bilinen bir malzeme ile kalibrasyonu yapıldıktan sonra malzeme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4'de gösterilen test cihazı kullanılarak yapılan uygulamayla ilgili açıklamalar aşağıda verilmiştir.

Cihaza yerleştirilen hücrenin yüzeyi, manometrenin üst kısımda yer alan soketin içine hava sızdırmazlığını sağlamak için dikkatli bir şekilde yerleştirilir. Malzeme yatağının bozulmaması önem arz etmektedir. Silindirin üstü bir tıpa yardımı ile kapatılır. Musluk açıldıktan sonra nazıkçe hava verilerek manometre sıvısı en üst çizgiye ulaştırılır, musluk kapatıldıktan sonra manometre sıvı seviyesinin sabit kalması beklenir. Bu işlem gerçekleştirildikten sonra musluk tekrar açılır ve nazıkçe hava verilerek sıvı seviyesi en üst çizgiye getirilir. Daha sonra ise musluk kapatılarak silindirin üzerindeki tıpa kaldırılır. Manometre sıvısı ikinci çizgi hizasına geldiği an kronometre başlatılır ve sıvı üçüncü çizgiye ulaşınca süre okunur. Süre (t) ve sıcaklık (°C) kaydedilir. Bütün yapılan bu işlem tekrarlanarak sıcaklık ve zaman değerleri kaydedilir.



Şekil 3.4. Blaine test cihazı (SDÜ-DEYMAM)

Hücreye yerleştirilen kütle her defasında aynı olacak şekilde sıkıştırılarak 0.500 porozitede bir yatak elde edilir. Delikli disk hücrenin tabanına yerleştirilir ve üzerine standart dairesel filtre kâğıdı konulur. Filtre kağıdının delikli disk üzerini tamamen kaplamadığından emin olduktan sonra çimento miktarı (m_1) dikkatlice yerleştirilir.

Hücre malzeme seviyesinin ayarlanabilmesi için hafifçe sarsılır. İkinci bir filtre kâğıdı düzeltilmiş malzeme üzerine yerleştirilir. Piston filtre kâğıdı ile hücreye konur. Piston nazik bir şekilde kapağın alt tarafı hücreye temas edinceye kadar preslenir. Piston yavaşça bir miktar geri çekilir ve ardından 90 derece döndürülür tekrar yatağın üzerine piston başlığı hücre ile temas edinceye kadar preslenir. Bu hareketle yatak sıkıştırılmış olur ve deneyi için hazır haldedir. Daha sonra piston nazikçe geri çekilir.

İşlem tekrar edilerek aynı malzemeden ikinci bir yatak hazırlanır. İkinci yatak üzerinde, geçirgenlik deneyi iki kez daha sıcaklık ve zaman değerleri kaydedilerek tekrarlanır.

Özgül yüzey alanları, TS EN 196-6 standardında verilen aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta_1}} \text{ cm}^2/\text{g} \quad (3.1)$$

Eşitlikte; K, cihaz sabiti, e, yatağın porozitesi, t, zaman (s), ρ , çimento yoğunluğu (g/cm^3) ve η , deney sıcaklığındaki ($20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) havanın viskozitesine (Pa.s) karşılıktır.

$e = 0.500$ porozite için;

$$S = \frac{524,2 K \times \sqrt{t}}{\rho} \text{ cm}^2/\text{g} \quad (3.2)$$

eşitliği kullanılmaktadır.

3.3. Numune Üretim Süreci ve Karışım Oranları

Çalışmada köpük beton numunelerinin tamamının aynı koşullar altında üretilebilmesi ve cihaz rejiminin değişmemesi için dökümler, hava sıcaklığının min. +20±5 ° C’de olduğu iklim koşullarında gerçekleştirilmiştir. Köpük beton harç bileşenleri oranlarının belirlenmesinde en düşük 300 kg/m³ yoğunluk temel alınmıştır. Karışım kıvamı, köpük stabilitesi ve yüksek dayanım için karışımda daha az su bulunması gereği su/katı oranın 0.60 olarak belirlenmesinde etkili olmuştur. Karışımın su miktarı çimentonun hidrolik bağ oluşturarak sertleşmesini ve priz süresini etkilemesi nedeniyle çimento ile değişen oranlarda kireç ikame edilmiş ve en uygun değer % 25’i olarak belirlenmiştir. Denemelerde çimentonun agregaya bağlayıcılık potansiyeli dikkate alınarak agregaya kullanımı ise karışımdaki toplam katı oranının % 61.5 oranında seçilmiştir. Bu ön denemelerde elde edilen veriler dikkate alınarak kullanılan malzemeler ile optimum köpük beton tasarımı kesinleştirilmiştir. Karışım tasarım planı hacim baz alınarak aşağıdaki eşitlikler yardımı ile hesaplanmıştır.

$$d = \frac{M_k}{V_T} \quad (3.3)$$

$$V_T = V_{\varphi} + V_a + V_s + V_f = 1000 \text{ dm}^3 \quad (3.4)$$

$$V_T = \frac{M_{\varphi}}{\rho_{\varphi}} + \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_s}{\rho_s} + (1000 - \frac{M_{\varphi}}{\rho_{\varphi}} + \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_s}{\rho_s}) \quad (3.5)$$

Eşitlikte;

M_k : Karışımdaki toplam katı (Çimento +Kireç +Mikronize Kuvars) kütlesi,

V_T : Toplam katının hacmi,

V_T : Karışımın toplam hacmi, (V_{φ}), çimento hacmi, (V_a), agregaya hacmi, (V_s), suyun hacmi, (V_f), Köpük hacmi, (M_{φ}), çimentonun kütlesi, (M_a), agregaya kütlesi, (M_s), suyun kütlesi, (ρ_{φ}), çimentonun özkütlesi, (ρ_a), agreganın özkütlesi, (ρ_s), suyun yoğunluğuna karşılıktır.

Otoklavlamanın etkisini yoğunluklara bağlı olarak inceleyebilmek ve kontrol numunesini de belirlemek üzere 300, 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklarında otoklavlanmış ve otoklavlanmamış köpük beton serileri dökülmüştür (Çizelge 3.2). İlk aşama numunelerinin otoklavlanmış ve havada kürlenmiş numuneler olarak

sırasıyla otoklavlanmış köpük beton (AFC) ve köpük beton (FC) olarak kodlandırılmış ve yoğunluk sınıfları kodların uzantısında belirtilmiştir.

Çizelge 3.2. Sabit su-katı oranında ve farklı köpük kullanım seviyelerinde (1 m³) harç karışımının bileşenleri

Su/Katı = 0.60						
Seriler	Kür Koşulu	Çimento (kg)	Kireç (kg)	Mikronize Kuvars (kg)	Su (kg)	Köpük (dm ³)
FC300	Havada Kür	92.50	23.12	185	180	710
AFC300	Otoklavlama	92.50	23.12	185	180	710
FC400	Havada Kür	123.00	33.00	246	240	614
AFC400	Otoklavlama	123.00	33.00	246	240	614
FC500	Havada Kür	154.00	48.50	308	300	517
AFC500	Otoklavlama	154.00	48.50	308	300	517

Bütün köpük beton serilerinin üretiminde önce malzeme harcı su ile karıştırılıp homojen hale getirilmiştir. Karışımındaki suyun sıcaklığı 22 derece olarak kaydedilmiştir. Daha sonra üretilen köpük mikser yardımı ile eklenerek 5 dakika kadar daha karıştırılmış ve sızdırmaz plastik kalıplara alınmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Köpük jeneratörü ve karışım

Kürleme işlemi sonrasında üretilen köpük beton numuneleri kesme cihazında yüzeyleri düzeltilmiş ve boyutlandırılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Kesme Cihazı (SDÜ-DEYMAM)

Dökülen ilk seri numuneler farklı kür koşullarına tabi tutulmuştur. Kür süresi tamamlanan numuneler kesme cihazı kullanılarak ve zımpara yardımı ile analizler için ilgili standartlarda belirtilen boyutlara getirilmiştir. Daha sonra etüvde kurutulmuş. (Şekil 3.7) ve boyutlar, 1/100 mm hassasiyetli elektronik kumpas yardımı ile ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Etüv cihazında kurutulan numuneler



Şekil 3.8. Köpük beton deney numuneleri

Serilerde hedeflenen ısı iletkenlik ve mekanik özellikleri sağladığı belirlenen 300 kg/m³ yoğunluğundaki (kontrol numunesi) otoklavlanmış köpük beton numunelerinde basit ikame yöntemi ile çimento yerine farklı oranlarda mineral katkıları kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında; F tipi uçucu kül (AFCFA), metakaolin (AFCMK) ve amorf silika (AFCAS) mineral katkıları % 5, 10 ve 15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Sabit su/katı oranında, farklı oranlarda uçucu kül, metakaolin ve amorf silika içeren harç bileşenleri (1 m³)

Su/Katı = 0.60								
Seriler	Çimento (kg)	Kireç (kg)	Mikronize Kuvars (kg)	Uçucu Kül (kg)	Metakaolin (kg)	Amorf Silika (kg)	Su (kg)	Köpük (dm ³)
AFC300	92.50	23.12	185,00	-	-	-	180	710
AFCFA-5	87,87	23.12	185,00	4.62	-	-	180	710
AFCFA-10	83.25	23.12	185,00	9.25	-	-	180	710
AFCFA-15	78.62	23.12	185,00	13.87	-	-	180	710
AFCMK-5	87,87	23.12	185,00	-	4.62	-	180	710
AFCMK-10	83.25	23.12	185,00	-	9.25	-	180	710
AFCMK-15	78.62	23.12	185,00	-	13.87	-	180	710
AFCAS-5	87,87	23.12	185,00	-	-	4.62	180	710
AFCAS-10	83.25	23.12	185,00	-	-	9.25	180	710
AFCAS-15	78.62	23.12	185,00	-	-	13.87	180	710

3.3.1. Kür koşulları

3.3.1.1. Havada kür

Havada küre tabi tutulan numuneler, sıcaklık ve nem değerleri ayarlanabilir bir iklim kabini (Şekil 3.9) içerisinde 28 gün boyunca % 95 bağıl nem 20 ± 5 °C’de tutulmuştur.

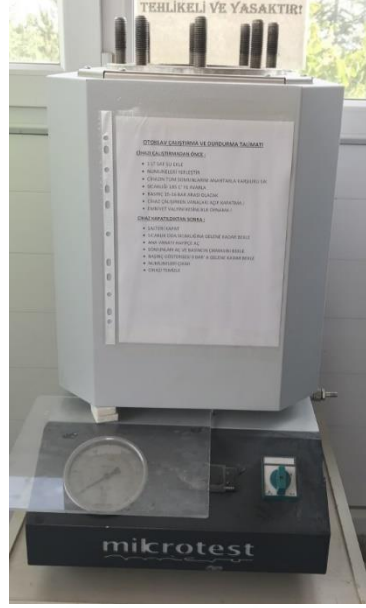


Şekil 3.9. Nem ve sıcaklık ayarlanabilen iklim kabini

3.3.1.2. Otoklavlama

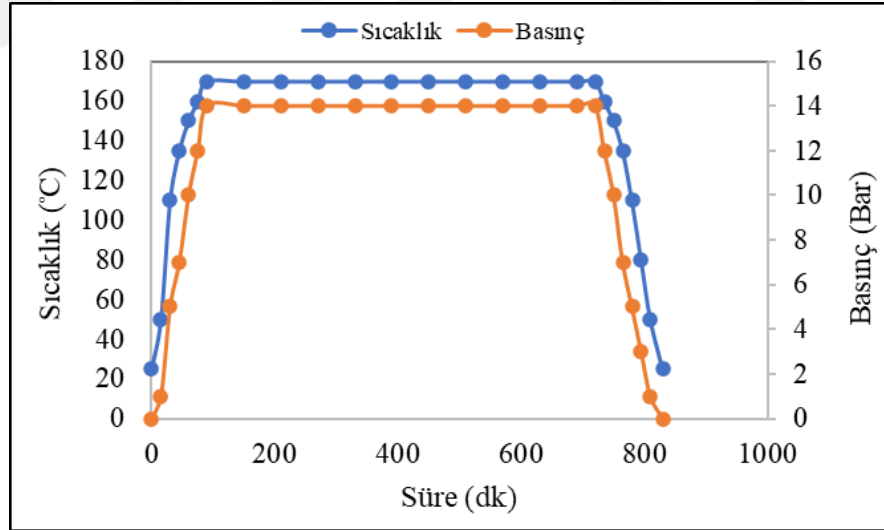
Microtest marka laboratuvar tipi otoklav cihazı çalışma aralığı maksimum 16 bar basınç ve 200°C ’dir. Otoklav iç hacmi yaklaşık 7 L’dir. Üretilen numunelerin cihaz içine yerleştirilebilen alan ise yaklaşık 2 L hacmindedir. Ancak otoklav cihazının güvenlik sebebiyle bina içerisinde yer almaması ve bu sebeple cihaz rejiminin değişmemesi için dış ortam sıcaklığının 20°C ve üstünde olması gerekmektedir. Bu nedenle çalışmanın her serisinde dış ortam sıcaklığının 20°C ve üstünde olması dikkate alınmıştır.

AFC serisi köpük beton numuneleri üretildikten sonra yüksek sıcaklık ve basınçta kürlenme işlemi otoklav cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Kürleme işlemi için kullanılan otoklav cihazı (SDÜ-DEYMAM)

Otoklavlanmış köpük beton numuneleri için cihaz 12 saat boyunca 170 ° C derecede ve 14 barlık basınç (1.4 MPa) şartlarında çalıştırılmıştır. Cihaz süre-basınç-sıcaklık ilişkisi Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Otoklav cihazının süreye bağlı sıcaklık ve basınç rejimi

3.4. Numune Analizleri

3.4.1. Eğilme ve basınç dayanımı

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri üzerinde, eğilme (3 noktadan yükleme) ve basınç dayanımı deneyleri TS EN 1015-11 standardı kapsamında gerçekleştirilmiştir. Kesme cihazı ve zımpara yardımı ile hazırlanan 40x40x160 mm boyutlarına sahip numunelere eğilme yükü, mesnetler arası mesafenin 100 mm olduğu ve yükleme hızının 30 N/s olarak seçildiği şartlarda, üst yüzeyin orta noktasından uygulanarak yükleme numune deformasyona uğrayıncaya kadar devam edilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımını, 3 adet numuneden elde edilen verinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları Eşitlik 3.6'de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{cf} = 1.5 \times F \times \frac{L}{b \times d^2} \quad (3.6)$$

Eşitlikte; F, elde edilen maksimum yük (N), f_{cf} , eğilme dayanımı (MPa), b ve d, numunenin en kesit boyları (mm), L, mesnet silindirleri arasındaki mesafe (mm),’dir.

Aynı numune gruplarında basınç dayanımı deneyleri yine 40x40x160 mm boyutlarındaki 6’şar adet numune üzerinde yürütülmüştür. Söz konusu uygulama eğilme ve basınç dayanımı deneyinde kullanılan test cihazının basınç dayanımı test bölümünde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12). Kalıptan çıkarılan numunenin kenarları, pres yükleme başlıklarına en yakın kenarlardan 16 mm $\pm$ 0,1 mm mesafede duracak şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme hızı TS EN 1015-11 standardına uygun olarak 250 N/s olarak seçilmiştir. Numune grubunun basınç dayanımı, 6 adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Köpük beton numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları Eşitlik 3.7’te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.7)$$

Eşitlikte; F, numunenin kırılma anındaki yükü (N), f_c , basınç dayanımı (MPa), A_c , numunenin yük doğrultusundaki kesit alanı (mm²)’dir.



Şekil 3.12. Otoklavlanmış köpük beton numunelerinin eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

3.4.2. Ultrasonik ses hızı ve dinamik elastisite modülü

Ultrasonik ses hızını ölçmek ve dinamik elastisite modülünü belirlemek amacıyla Proceq marka (Proceq, Pundit Lab+) test aralığı 0.1-9999 μ s olan ultrasonik test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.13). Ölçümlerde 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numuneler kullanılmıştır. Ultrasonik geçiş hızı tayini için ASTM C597 standardından yararlanılmıştır. Değişmez ağırlıklarda ölçümleri yapılan FC ve AFC serileri numunelerinde, pundit cihazı ile P dalgasının geçiş hızı ölçümü tamamlandıktan sonra Eşitlik 3.8 ve 3.9 yardımı ile dinamik elastisite modülü belirlenmiştir (Postacıoğlu, 1975).

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.8)$$

Eşitlikte; V, boyuna dalga hızı (km/s), L, numune uzunluğu (cm) ve t, ultrasonik ses dalgasının bir uçtan diğer uca ulaşmasında geçen süreyi (s) belirtmektedir.

$$E_d = 10^5 \times V^2 \times \frac{\Delta}{g} \quad (3.9)$$

Eşitlikte; E_d : dinamik elastisite modülü (kgf/cm^2), V, boyuna dalga hızı (km/s), Δ : kuru birim hacim kütle (kg/dm^3) ve g: yerçekimi ivmesine (kgf cm/s^2) karşılıktır.



Şekil 3.13. Ultrasonik ses hızı cihazı ve numune ölçümleri

3.4.3. Kuruma büzülmesi

Her seri için 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler, farklı kür uygulamaları sonrası $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'de $\%45 \pm 5$ bağıl nemde TS EN 680 standardına göre iklim kabini içinde şartlandırılmıştır (Şekil 3.14). Şartlandırma süresi sonunda ve kuruma süresi boyunca uygun zaman aralıklarında test numunelerinin boy değişimleri belirlenmiştir. Toplam kuruma büzülmesinin değerinin bulunabilmesi için ise sabit uzunluğa ulaşana kadar olan bağıl uzunluk değişimi ölçülmüştür. Bunun için Eşitlik 3.10 kullanılmıştır.

$$\varepsilon_{csi} = \frac{\Delta L_c}{L_c} \times 1000 = \frac{(L_{c0} - L_{ci}) - (L_{inv,0} - L_{inv,i})}{L_c} \times 1000 \quad (3.10)$$

Eşitlikte; ε_{csi} : bağıl uzunluk değişimi (mm), ΔL_c (mm), numunenin ilk boyu ve ölçüm günündeki boyu arasındaki farktan standard çubuk boy değişim farkının çıkarılmasına, L_c (mm), numunenin ilk boyu, L_{c0} (mm), numunenin ilk ölçümdeki boyu, L_{ci} (mm), numunenin ölçüm günündeki boyu $L_{inv,0}$ (mm), ilk ölçümdeki standard çubuk boyu, $L_{inv,i}$ (mm), ölçüm günündeki standard çubuk boyuna karşılıktır.



Şekil 3.14. Rötre numuneleri ve ölçümler

3.4.4. Isıl iletkenlik

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerinden 3'er adet 55 mm çapında 25 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kesilmiş ve yüzeyleri zımpara ile düzeltilmiştir. Numuneler ısı iletkenlik ölçümleri öncesinde hava dolaşımli etüvde 70°C'de sabit kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Daha sonra söz konusu numunelerin ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri, TS EN 12664 ve TS EN 12667 standartlarına uygun olarak Lasercomp Fox50 ısı iletkenlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.15). Test cihazının sıcak ve soğuk plakaları arasında sıcaklık farkı (ΔT) 10 °C olarak ayarlanmıştır. Cihazın ölçüm prensibi Fourier denklemine (3.11) dayanmakta ve doğrudan ısı iletkenlik katsayısı belirlenmektedir.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.11)$$

Eşitlikte; Q, ısı kaybı (W), k, ısı iletkenlik katsayısı (W/mK), A, numune yüzey alanı (m²), T, sıcaklık farkı (K), x numune kalınlığı (m).



Şekil 3.15. Laser Comp Fox 50 Isı iletkenlik test cihazı (SDÜ-DEYMAM)

3.4.5. Su buhar difüzyon direnci

Su buhar difüzyon direnci belirlemeleri için otoklavlanmış ve havada kürlenmiş farklı yoğunluklardaki köpük beton numunelerinden kuru kap ebadında 175 x 120 x 40 mm boyutlarında 3'er adet numune kesilmiş ve TS EN ISO 12572 ve TS EN 12086 standartlarına uygun olarak analiz edilmişlerdir. Su buhar difüzyon deney numunelerinin boyutları elektronik kumpasla ölçülmüş ve değerler kaydedilmiştir. Deney numuneleri iklim kabinine yerleştirilme öncesi yani başlangıçta hava dolaşımli etüvde 50°C'de sabit kütleye kadar kurutulmuştur.

Kuru kap yönteminin uygulandığı deneyde; kap tabanına nem tutucu uygun kimyasal madde olarak tane boyutu < 3 mm olan 15 mm yüksekliğinde kalsiyum klorür (CaCl_2) konulmuş, numune ve kimyasal madde yüzeyleri arasında 15 mm hava boşluğu bırakılmış ve kap-numune temas noktaları parafinle sızdırmaz hale getirilmiştir. Deney kapları, sıcaklığı 23 ± 0.5 °C ve bağıl nemi $\%50 \pm 3$ olan yeterli hava dolaşımli iklim kabini içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Nem ve sıcaklık ayarlanabilen iklim kabininde su buharı difüzyon numuneleri

Deney kaplarının kütleleri uygun aralıklar ile 1/1000 g hassasiyetinde elektronik terazi ile tartılmış ve tartım işlemlerine kap kütleleri yaklaşık sabit hale gelinceye kadar devam edilmiştir. Su buharı basınç farkları (ΔP_v) Eşitlik 3.12’de verilen bağıntı kullanılarak belirlenmiştir.

$$\Delta P_v = (P_{S1} \times \varphi_1) - (P_{S2} \times \varphi_2) \quad (3.12)$$

Eşitlikte; ΔP_v ; su buharı basınç farkı (Pa), P_{S1} ; deney hücresinde bulunun su buharının doyguluk basıncı (Pa), φ_1 , deney hücresi içerisindeki bağıl nem (%), P_{S2} , nem çekici numune üzerindeki su buharı doyguluk basıncı (Pa), φ_2 , nem çekici numune üzerindeki bağıl nem (%)’ dir. Nem çekici numune üzerindeki doyguluk basıncı “0” kabul edilmiştir.

$$P_{S1} = a \times \left(b + \frac{T-273,15}{100} \right)^n \quad (3.13)$$

Eşitlikte; a, sabit bir sayı (288.68 Pa), b, sabit bir sayı (1.098), n, sabit bir sayı (8.02) ve T, sıcaklığı (K) ifade etmektedir.

Daha sonraki aşamada, TS EN ISO 12572 ve TS EN 12086 standartlarında belirtilen ilke ve eşitliklere (Eşitlik 3.12-3.21) uygun olarak, su buharı akış hızı (G), su buharı iletim debisi (g), su buharı geçişi (W), su buharı direnci (Z), malzemenin su buharı

geçirgenliği (δ), havanın su buharı geçirgenliği (δ_{hava}) ve su buharı difüzyon direnç faktörleri (μ) hesaplanmıştır.

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (3.14)$$

Eşitlikte; G, deney numunesi kütlesindeki değişim (mg/h), m_1 , deney düzeneğinin (ya da numunesinin) t_1 anındaki kütlesi (mg), m_2 , deney düzeneğinin t_2 anındaki kütlesi, t_1 ve t_2 ardışık tartım sürelerini (h) belirtmektedir.

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.15)$$

Eşitlikte; g, su buharı iletim debisi (mg/m²h), G, deney numunesi kütlesindeki değişim (mg/h) ve A, deney numunesinin etkiye maruz kalan (alt ve üst) alanların aritmetik ortalamasına (m²) karşılıktır.

$$W = \frac{G}{A \times \Delta P} \quad (3.16)$$

Eşitlikte; W, su buharı geçişi (mg/m².h.Pa), A, deney numunesinin etkiye maruz kalan (alt ve üst) alanların aritmetik ortalamasına (m²) ve ΔP ; su buharı basınç farkını (Pa) ifade etmektedir.

$$Z = \frac{1}{W} \quad (3.17)$$

Eşitlikte; Z, su buharı direncini (m².h.Pa/mg) ve W, su buharı geçişinin (mg/m².h.Pa), karşılığıdır.

$$\delta = W \times d \quad (3.18)$$

Eşitlikte; δ , su buharı geçirgenliği (mg/ m².h.Pa) W, su buharı geçişi (mg/m².h.Pa) ve d, deney numunesi kalınlığını (m) belirtmektedir.

$$\mu = \frac{\delta_{hava}}{\delta} \quad (3.19)$$

Eşitlikte; μ , su buharı difüzyon direnç faktörü ve δ_{hava} , havanın su buharı geçirgenliğini ($\text{mg/m}^2.\text{h.Pa}$) ve δ , su buharı geçirgenliğini ($\text{mg/ m}^2.\text{h.Pa}$) belirtmektedir.

$$\delta_a = \frac{0,083}{R_v \times T} \times \frac{P_0}{P} \times \left(\frac{T}{273,15} \right)^{1,81} \quad (3.20)$$

Eşitlikte; R_v , su buharının gaz sabiti ($462 \times 10^{-6} \text{ J/mg.K}$), T , deney sıcaklığı (K), P_0 , deney sırasındaki ortalama barometrik basınç (hPa), P , normal barometrik basınç (1013.25 hPa) karşılığıdır. δ_a değeri, TS EN 12086 standardı Şekil 1’de verilen grafikte 900 mbar için 0.79 ve 950 mbar için 0.75 olarak verilmiştir. Ayrıca su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabakası Eşitlik 3.21’da verilen bağıntı ile hesaplanmıştır:

$$S_d = \mu \times d \quad (3.21)$$

Eşitlikte; S_d , su buharı difüzyonu eşdeğer hava tabakası (m), μ , su buharı difüzyon direnç faktörü ve d , deney numunesi kalınlığını (m) ifade eder.

3.4.6. Kuru birim hacim kütle

Köpük beton numunelerinin kuru birim hacim kütlelerini belirlemek üzere TS EN 1015-10 standardından yararlanılmıştır. Numuneler sabit kütleye gelinceye kadar hava dolaşımli etüvde 70°C ’de kurutulmuştur. Kuruyan numuneler elektronik terazi yardımı ile ölçülülerek kütleleri kaydedilmiştir. Daha sonra numunelerin eni (w), boyu (L) ve yüksekliği (h) elektronik kumpasla yardımı ile ölçülerek hacmi hesaplanmıştır. Numunelerin kuru birim hacim kütlesi olarak, 6 adet numunenin aritmetik ortalaması değerlendirilmiştir. Numune kuru birim hacim kütlesi Eşitlik 3.22’de verilen Eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D_{\text{Kuru}} = \frac{M_{\text{Skuru}}}{V_s} \quad (3.22)$$

Eşitlikte; D_{kuru} , birim hacim kütle (kg/m^3), M_{Skuru} , kuru durumdaki kütle (g), V , hacmi (cm^3) belirtmektedir.

3.4.7. Kapiler su emme

Kuru durumda olan 40x40x160 mm boyutlarındaki 3'er adet numune üzerinde gerçekleştirilen deney TS EN 1015-18 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). Bir kısmı su içerisine yerleştirilen numunelerin kütle ölçümleri 10. ve 90. dak'nın sonunda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kapiler su emme katsayıları Eşitlik 3.23'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$c = 0.1 \times (M_2 - M_1) \quad (3.23)$$

Eşitlikte; c, kapiler su emme katsayısı ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{dak}^{0.5}$), M_1 , numunenin 10. dak'nın sonunda tartılan kütlesi (g) ve M_2 , numunenin 90. Dak'nın sonunda tartılan kütlesini (g) belirtmektedir. Üretilen numune grupları için kapiler su emme katsayısı, 3 adet numunenin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.17. Kapiler su emme testi

3.4.8. Mikro-Yapısal özellikler

Farklı yoğunluklardaki otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerinin SEM görüntüleri SDÜ YETEM'den alınmış ve numunelerde gözenek dağılımı, boyutları ve boşlukların birbiriyle (açık veya kapalı gözenek oluşumu) bağlantılı olup olmadıkları incelenmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. SEM Cihazı (SDÜ-YETEM)

3.4.9. Hidratasyon ürünleri mineralojik özellikler

Aynı yoğunluktaki (300 kg/m^3) otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerinin ve mineral katkı otoklavlanmış köpük beton serilerinin tamamının mineralojik özellikleri, SDÜ YETEM’de XRD cihazı kullanılarak belirlenmiştir. (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. X-Işını difraksiyon cihazı (XRD, SDÜ-YETEM)

Numune ölçümlerinde arka plan uyumu çok önemli bir role sahipse de genellikle göz ardı edilmektedir. Zamana dayalı analizlerin tutarlılığını etkileyebileceği ve farklı operatörler arasındaki değişkenliği artırabileceği için manuel arka plan uydurma işleminden kaçınılmalıdır. Doğru bir yerleştirme uygulamasının yapılmaması, arka planın amorf fazlar ile örtüşmesine ve dolayısıyla içeriklerin olduğundan daha az tahmin edilmesine yol açabilir. Araştırmacılara göre, genellikle çimentolu malzeme analizleri için benimsenen uygulama, $7-70^\circ 2\theta$ aralığında (CuK α) her zaman yukarı doğru içbükey olması şeklindedir (Matos vd., 2022).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Hammadde Özellikleri

4.1.1. Özkütle

Çalışma kapsamında kullanılan hammadde ve silika içeriği yüksek mineral katkı malzemelerinin özkütle değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. En yüksek özkütle değeri (3.123 g/cm^3) çimento için belirlenirken, mineral katkı malzemeleri içerisinde en düşük özkütle (2.049 g/cm^3) uçucu kül en yüksek özkütle (2.724 g/cm^3) ise metakaolin için bulunmuştur. Bağlayıcı ve agrega hammaddeleri ile mineral katkı malzemelerinin özkütle değerleri, daha önce yapılan çalışmalarda belirlenmiş değerler aralığında bulunmaktadır.

Çizelge 4.1. Hammadde ve mineral katkıların özkütle bulguları

Numune	Kullanım Amacı	Özkütle (g/cm^3)					
		1	2	3	4	5	Ort.
Çimento	Bağlayıcı	3.102	3.151	3.130	3.111	3.119	3.123
Kireç	Bağlayıcı	2.241	2.189	2.401	2.398	2.308	2.307
Mikronize Kuvars	Agrega	2.725	2.578	2.664	2.637	2.596	2.640
Uçucu Kül	Mineral Katkı	1.976	2.105	2.102	1.989	2.072	2.049
Metakaolin	Mineral Katkı	2.811	2.597	2.691	2.765	2.754	2.724
Amorf Silika	Mineral Katkı	2.551	2.500	2.378	2.320	2.481	2.446

4.1.2. Özgül yüzey alanı

Hammadde ve mineral katkıların Blaine testi kapsamında özgül yüzey alanı belirlemelerine ilişkin veriler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Mineral katkı maddeleri içerisinde en yüksek özgül yüzey alanı ($16661 \text{ cm}^2/\text{g}$) metakaolin için bulunurken amorf silikanın özgül yüzey alanının da yüksek olduğu gözlenmektedir. Tüm hammadde ve mineral katkılar içerisinde en düşük özgül yüzey alan ($3305 \text{ cm}^2/\text{g}$), uçucu kül için belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. Hammadde ve mineral katkıların özgül yüzey alanı değerleri

K	P (g/cm ³)	η_1 (Pa.s)	e	t(s)	S (cm ² /g)
19.919	2.7	0.00001819	0.727	179.00	16431
19.919	2.7	0.00001819	0.718	226.00	17567
19.919	2.7	0.00001819	0.729	165.00	15986
Metakaolin					16661*
19.919	2.4	0.00001819	0.593	280.00	11314
19.919	2.4	0.00001819	0.602	273.00	11696
19.919	2.4	0.00001819	0.598	261.00	11186
Amorf silika					11399
19.919	2.3	0.00001819	0.716	85.00	12620
19.919	2.3	0.00001819	0.710	84.00	12095
19.919	2.3	0.00001819	0.711	80.00	11848
Kireç					12188
19.919	2.05	0.00001819	0.447	74.00	3351
19.919	2.05	0.00001819	0.437	77.50	3253
19.919	2.05	0.00001819	0.437	80.00	3310
Uçucu Kül					3305
19.919	2.64	0.00001819	0.541	81.20	4378
19.919	2.64	0.00001819	0.527	77.20	3973
19.919	2.64	0.00001819	0.532	80.00	4149
Mikronize Kuvars					4167
19.919	3.1	0.00001819	0.486	137.00	3670
19.919	3.1	0.00001819	0.500	134.00	3897
19.919	3.1	0.00001819	0.487	141.00	3750
TÇMB Referans Çimento					3772

* Ortalama Değer

4.1.3. Kimyasal bileşenler

Hammadde ve mineral katkı malzemelerinin kimyasal bileşenlerine ilişkin veriler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Tez kapsamında belirtildiği ve analiz bulgularıyla doğrulandığı üzere mineral katkı maddelerinin silika içerikleri yüksek bulunmuştur. Bu bağlamda mineral katkı maddeleri silika içeriklerinin amorf silika için % 90.84 olarak en yüksek, metakaolin ve uçucu külün ise birbirine yakın bulunduğu gözlenmektedir. Diğer belirtilmesi gereken bir husus metakaolinin % 43.97 alüminyum oksit (Al₂O₃) içeriği farklılığıdır.

Çizelge 4.3. Kullanılan hammaddelerin kimyasal özellikleri

Ana Bileşenler	Mikronize Kuvars (%)	Kireç (%)	Amorf Silika (%)	Metakaolin (%)	Uçucu Kül (%)
SiO ₂	98.50	0.13	90.84	52.89	58.07
Al ₂ O ₃	0.60	0.05	2.66	43.97	20.04
Fe ₂ O ₃	0.06	0.05	0.15	0.49	8.96
TiO ₂	0.04	0.00	1.24	1.58	0.00
CaO	0.00	70.42	0.18	0.35	2.69
MgO	0.00	0.39	0.00	0.03	3.94
SO ₃	0.00	0.07	0.06	0.00	0.42
Na ₂ O	0.10	0.04	1.12	0.08	1.19
K ₂ O	0.10	0.01	0.09	0.09	1.66

4.2. Otoklavlanmış ve Havada Kürlenmiş Köpük Betonların Özellikleri

4.2.1. Fiziksel özellikler

4.2.1.1. Kuru birim hacim kütle

4.2.1.1.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

Otoklavlanmış ve havada kürlenen köpük beton numunelerinin kuru yoğunluk belirlemesine ilişkin veriler Çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Teorik olarak 300, 400 ve 500 kg/m³ kuru yoğunluklarında tasarlanan numunelerin yoğunluk değerleri, FC500-AFC500 numunelerinde haricinde diğer FC numunelerinde biraz daha yüksek bulunmuştur. Diğer bir yaklaşımla FC300-400 ve AFC300-400 numunelerine ilişkin kuru yoğunluk farklılıkları, otoklavlamanın kuru yoğunlukta ihmal edilebilecek bir düşüşe yol açtığını göstermektedir.

Çizelge 4.4. Otoklavlanmış ve havada kürlenen farklı kuru yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve yoğunlukları

Numune No	Kütle(g)	En (mm)	Boy (mm)	Yükseklik (mm)	V (mm ³)	d (kg/m ³)
AFC300-1	83.90	41.44	160.30	40.75	270695	310
AFC300-2	82.49	40.15	159.60	41.83	268044	308
AFC300-3	79.10	40.10	161.70	39.38	255347	310
Ort.						309
FC300-1	95.08	41.75	161.95	42.85	289727	328
FC300-2	90.39	41.50	162.21	42.50	286098	316
FC300-3	89.09	41.35	162.13	41.00	274867	324
Ort.						323

Çizelge 4.4. Otoklavlanmış ve havada kürlenen farklı kuru yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve kuru yoğunlukları (Devam)

AFC400-1	116,30	41,14	161,26	41,65	276316	421
AFC400-2	115,84	41,60	161,13	41,25	276499	419
AFC400-3	119,31	41,40	162,04	42,01	281822	423
Ort.						421
FC400-1	112,25	41,40	159,66	39,50	261092	430
FC400-2	109,51	40,33	159,74	39,72	255889	428
FC400-3	112,27	40,54	160,6	40,00	260429	431
Ort.						430
AFC500-1	139,98	39,76	159,02	42,07	265993	526
AFC500-2	139,04	40,34	159,93	41,22	265934	523
AFC500-3	144,22	41,28	160,35	41,90	277346	520
Ort.						523
FC500-1	139,87	41,02	160,61	41,29	272028	514
FC500-2	138,99	40,55	160,78	40,66	265088	524
FC500-3	132,99	40,11	158,83	39,51	251705	528
Ort.						522

4.2.1.1.2. Otoklavlanmış mineral katkıli köpük betonlar

Farklı oranlarda mineral katkı ikamesi yapılan AFC 300 numunelerinin belirlenen kuru yoğunlukları Çizelge 4.5’de verilmiştir. Mineral katkıların herbiri için belirgin ve anlamlı bir kuru yoğunluk ilişkisi söz konusu değildir. Ancak mineral katkı türüne bağlı olarak gözlenen değişimler kapsamında; en düşük kuru yoğunlukların uçucu kül ve en yüksek kuru yoğunlukların ise metakaolin için elde edildiği ortadadır.

Çizelge 4.5. Otoklavlanmış ve aynı teorik yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve kuru yoğunlukları

Numune No	Kütle(g)	En (mm)	Boy (mm)	Yükseklik (mm)	V (mm ³)	d (kg/m ³)
AFCFA-5-1	78,14	41,07	161,07	41,63	275388	284
AFCFA-5-2	78,13	40,65	161,60	41,25	270973	288
AFCFA-5-3	77,84	41,06	161,65	41,31	274189	284
Ort.						285
AFCFA-10-1	80,51	40,91	161,34	41,57	274379	293
AFCFA-10-2	79,21	41,34	161,37	40,48	270044	293
AFCFA-10-3	80,31	42,40	161,47	40,79	279262	288
Ort.						291

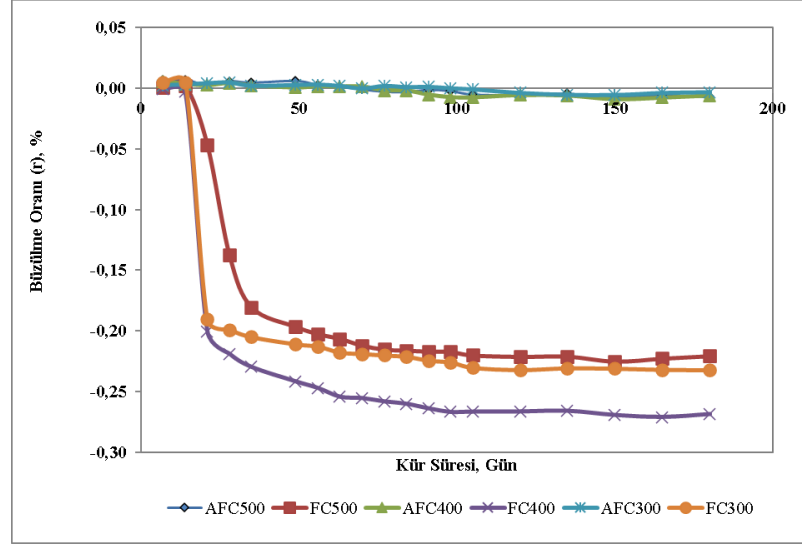
Çizelge 4.5. Otoklavlanmış ve aynı teorik yoğunluklardaki köpük betonların kütle, hacim ve kuru yoğunlukları (Devam)

AFCFA-15-1	76,92	41,56	161,60	40,94	274957	280
AFCFA-15-2	75,97	41,09	161,65	40,41	268411	283
AFCFA-15-3	77,25	41,33	161,47	41,54	277219	279
Ort.						280
AFCAS-5-1	84,02	41,46	161,04	40,98	273612	307
AFCAS-5-2	84,40	42,29	161,04	41,25	280928	300
AFCAS-5-3	85,65	41,98	161,50	41,24	279598	306
Ort.						305
AFCAS-10-1	80,97	42,45	160,5	39,43	268645	301
AFCAS-10-2	83,38	42,05	160,5	40,27	271783	307
AFCAS-10-3	83,03	41,24	160,62	42,56	281916	295
Ort.						301
AFCAS-15-1	86,07	41,95	161,7	40,94	277709	310
AFCAS-15-2	84,22	41,44	161,81	40,94	274519	307
AFCAS-15-3	80,98	40,68	159,54	41,74	270896	299
Ort.						305
AFCMK-5-1	86,85	41,41	161,28	41,45	276828	314
AFCMK-5-2	89,17	41,35	162,61	41,84	281329	317
AFCMK-5-3	87,28	41,28	161,68	42,13	281182	310
Ort.						314
AFCMK-10-1	82,41	41,90	162,97	39,71	271157	304
AFCMK-10-2	83,92	41,58	162,14	41,54	280054	300
AFCMK-10-3	84,39	41,19	162,54	42,03	281392	300
Ort.						301
AFCMK-15-1	85,96	40,94	161,73	41,21	272861	315
AFCMK-15-2	88,49	42,62	161,22	41,00	281719	314
AFCMK-15-3	89,09	41,68	162,35	41,22	278925	319
Ort.						316

4.2.1.2. Kuruma büzülmesi

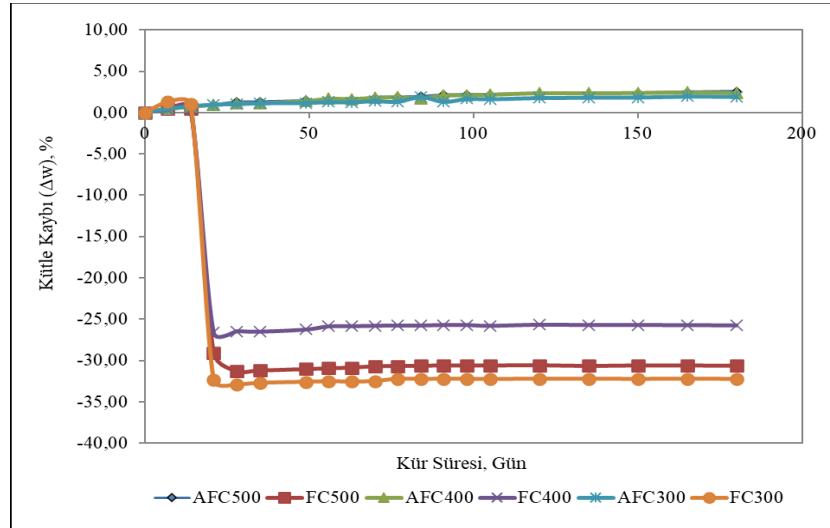
Farklı şekilde kürlenmiş numunelerin ilk 3 ay 7 günde bir sonraki 3 ayda ise 15 günde bir olmak üzere 6 aylık süre itibarıyla sergiledikleri kuruma büzülmesi ve kütle kaybı oranlarının zamana bağlı değişimleri Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilmiştir.

Serilerin büzülme oranları değerlendirildiğinde; AFC için %0.003 - 0.007 ve FC için %0.22 - 0.28 aralıklarında bir değişim söz konusudur. AFC serisi için kuruma büzülme oranları çok daha düşük ve zamana bağlı değişimleri de nispeten ihmal edilebilir seviyededir.



Şekil 4.1. FC ve AFC serilerinde 180 gün süre ile incelenen kuruma büzülmesi değişimi

Serilerin kütle kaybı oranları değerlendirildiğinde; FC için %25.74 – 32.23 ve AFC için %1.93 – 2.58 aralıklarındadır. FC serisi için buharlaşma ve hidratasyona bağlı kütle kaybının ilk 28 gün sonrasında dengeye ulaştığını bunun nedeninin olduğu değerlendirilmektedir. AFC serisi için kütle kaybı oranları çok daha küçük olmakla birlikte iki seride de zamana bağlı değişimlerinin nispeten ihmal edilebilir seviyededir. AFC serisi için değerler oldukça düşük olup, FC serisi için söz konusu bir ilişki ise bulunamamıştır.



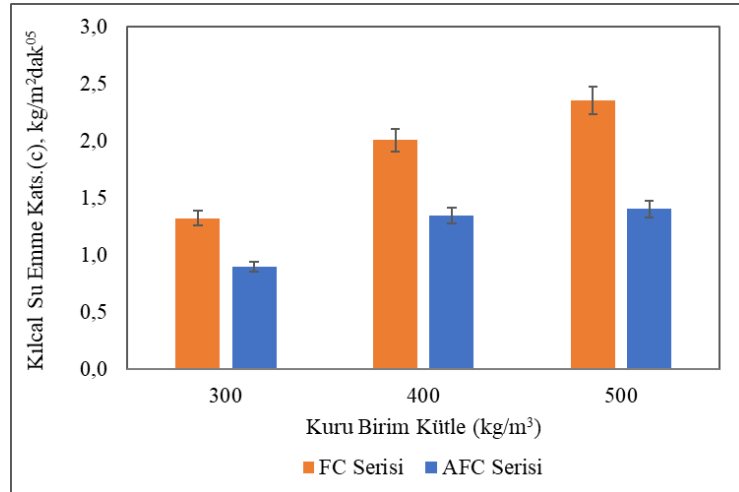
Şekil 4.2. FC ve AFC serilerinde 180 gün süre ile incelenen kütle kaybı değişimi

4.2.1.3. Kapiler su emme

4.2.1.3.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

FC ve AFC serilerinde kapiler su emme katsayıları, yoğunluğa bağlı olarak artma eğilimi göstermiştir. FC serisinde kapiler su emme katsayısı-yoğunluk ilişkisinin çok daha belirgin olduğu, AFC serisinde ise 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklar için nispeten küçük bir farklılığın bulunduğu gözlenmiştir (Şekil 4.3). En düşük kapiler su emme katsayısını (0.90 kg/m²dak^{0.5}) AFC300 numunesi sergilemiştir.

FC serisine göre AFC serisi kapiler su emme katsayıları tüm yoğunluklar için daha düşüktür. Bu durum, otoklavlama etkisi olarak yorumlanmıştır. Nitekim, FC serisine göre AFC serilerinde; 300 kg/m³ yoğunluk için %32, 400 kg/m³ yoğunluk için %33 ve 500 kg/m³ yoğunluk için ise %40'lık bir azalma söz konusudur. Otoklavlama, kapiler su emme katsayısında belirgin bir azalmaya yol açmıştır. Bu bağlamda bir ısı yalıtım malzemesinde kapiler su emme katsayısının düşüklüğünün ısı iletimi üzerinde pozitif etkiye neden olacağı göz önüne alındığında, havada kürlemeye göre otoklavlamanın olumlu etkisi oldukça belirgindir.



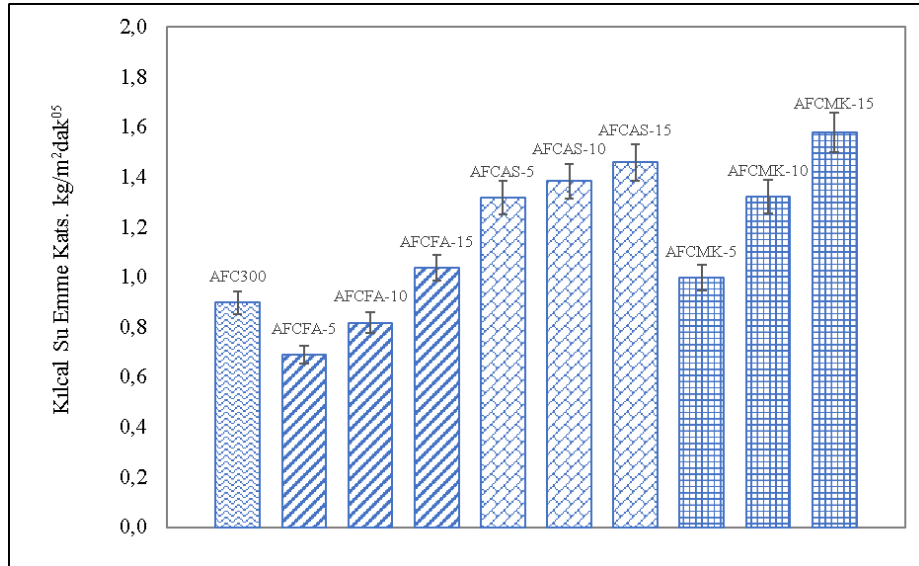
Şekil 4.3. FC ve AFC serileri kapiler su emme katsayıları

4.2.1.3.2. Otoklavlanmış mineral katkı köpük betonlar

AFC300 serisinde farklı mineral katkı kullanımının kapiler su emme katsayıları üzerine etkileri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

Kapiler su emme katsayıları, mineral katkı malzemelerinin tümü için kullanım oranı artışına bağlı olarak artmıştır. Ancak değişim seviyelerinin büyüklüğü itibarıyla AFCAS uygulamasının etkinliği AFCFA ve AFCMK numunelerine göre daha düşüktür. Bunun sebebi olarak amorf silikanın koloidal silika olması nedeniyle poroz ve su emmeyi artırması olarak yorumlanmıştır. Nitekim kapiler su emme katsayılarının AFCAS numunelerinde 1.32’den 1.46’ya, AFCFA ve AFCMK numuneleri için ise sırasıyla 0.69’dan 1.04’e ve 1.0’den 1.58’e yükselmiştir.

İncelenen mineral katkı malzemeleri kapsamında; AFCAS, AFCMK numunelerinin tümü ve AFCFA-15 numunesi kapiler su emme katsayısında artışa neden olurken AFCFA-5 ve AFCFA-10 numunelerinin etkisi ters yönde gerçekleşmiştir. Diğer bir deyimle uçucu külün %5 ve 10 oranlarında çimento ile ikamesi kapiler su emme katsayısında azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.4. Mineral katkı AFC300 serisi kapiler su emme katsayıları

4.2.1.4. Su buhar difüzyon direnci

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerine ilişkin deney ortam (nem, sıcaklık ve atmosfer basıncı) şartları ve su buharı akımı ($\Delta G/\Delta t$) verileri (mg/h) Çizelge 4.6-4.11’de gösterilmiştir.

Köpük beton su buhar akımları, FC numuneleri için ortalama 0.0857- 0.1234 mg/h ve AFC numuneleri için ise ortalama 0.1017- 0.1245 mg/h aralıklarında değişmektedir. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numunelerinde yoğunluk artışı, su buharı akımının azalmasına yol açmıştır.

Kürleme yöntemi farklılığına bakılmaksızın 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklar için su buharı akımlarında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ancak 300 kg/m³ yoğunluk için durum farklıdır. Söz konusu yoğunluk için kürleme yöntemi farklılığı bir değişim yaratmamakla birlikte yoğunluğun 400 kg/m³’e yükselmesiyle su buharı akımında anlamlı bir azalma gözlenmiştir. AFC300 uygulaması için gerçekleşen azalışın daha düşük olduğu kaydedilmiş ve bu bağlamda otoklavlanmanın su buharı akımında artışa yol açtığı değerlendirilmiştir.

Havada kürlenmiş ve otoklavlanmış köpük beton numunelerinin zamana bağlı su buharı akışları ilk 20 saatlik süre boyunca daha yüksek bir hızla gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.6. FC300 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	48	23.5	892	388.04	386.18	396.77
17.00				390.82	388.30	399.57
24.00				391.78	389.15	400.47
41.00				394.09	391.19	402.66
48.00				394.99	391.96	403.48
65.00				396.95	393.74	405.35
72.00				397.76	394.45	406.15
89.00				399.57	396.12	407.90
96.00				400.36	396.82	408.67
Ort. ΔG/Δt				0.1283	0.1180	0.1240

Çizelge 4.7. FC400 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	49.8	22.3	898	464.05	444.60	480.35
17.00				466.26	446.88	482.55
24.00				466.96	447.65	483.32
41.00				468.44	449.24	484.75
48.00				469.02	449.85	485.30
65.00				470.23	451.18	486.49
72.00				470.71	451.71	486.96
89.00				471.71	452.91	488.03
96.00				472.23	453.41	488.53
Ort. ΔG/Δt				0.0852	0.0918	0.0852

Çizelge 4.8. FC500 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	49.8	22.3	898	548.24	525.74	519.51
17.00				550.27	527.88	521.42
24.00				551.02	528.59	522.09
41.00				552.51	530.08	523.49
48.00				553.10	530.75	524.10
65.00				554.37	532.03	525.44
72.00				554.84	532.52	525.84
89.00				556.02	533.74	526.99
96.00				556.47	534.24	527.46
Ort. ΔG/Δt				0.0857	0.0885	0.0828

Çizelge 4.9. AFC300 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	48	23.5	892	366.16	348.08	349.87
17.00				368.92	350.86	352.46
24.00				369.88	351.80	353.36
41.00				372.23	354.08	355.49
48.00				373.13	354.94	356.30
65.00				375.14	356.93	358.13
72.00				375.95	357.72	358.88
89.00				377.77	359.48	360.56
96.00				378.51	360.17	361.29
Ort. ΔG/Δt				0.1286	0.1259	0.1190

Çizelge 4.10. AFC400 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

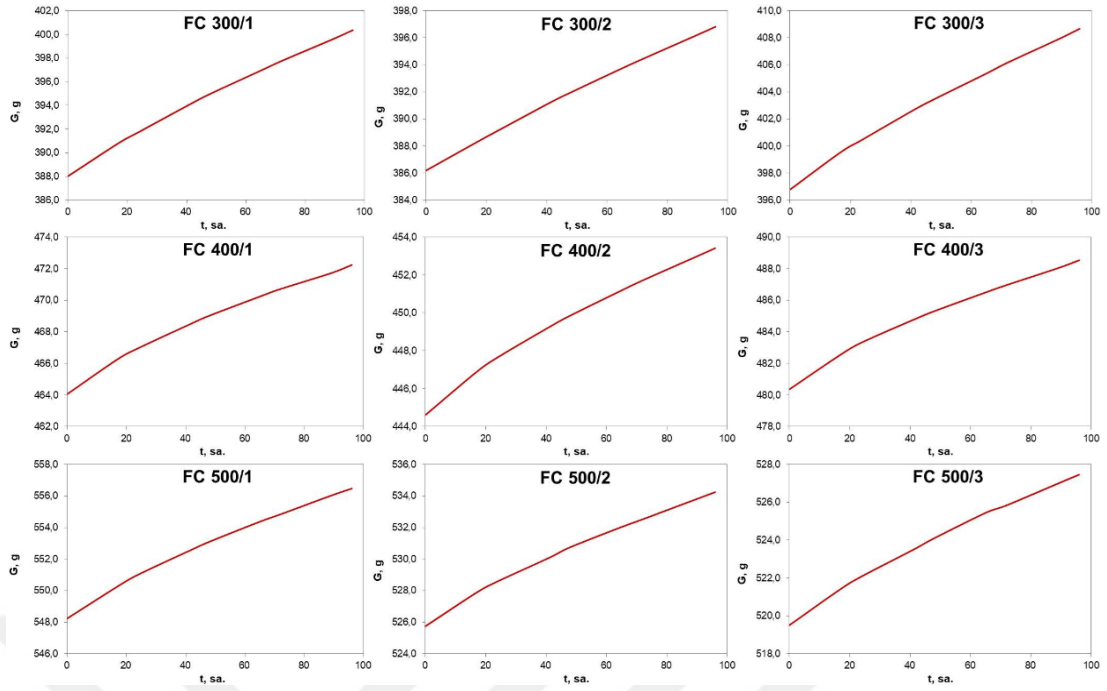
Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	48	23.5	892	421.60	445,43	459,51
17.00				424.45	448,63	462,66
24.00				425.28	449,47	463,54
41.00				427.10	451,43	465,43
48.00				427.74	452,11	466,11
65.00				429.20	453,64	467,53
72.00				429.75	454,24	468,11
89.00				431.01	455,57	469,38
96.00				431.52	456,15	469,93
Ort. ΔG/Δt				0.1033	0.1117	0.1085

Çizelge 4.11. AFC500 numuneleri için deney ortamı şartları ve su buharı akımları, $\Delta G/\Delta t$ (mg/h)

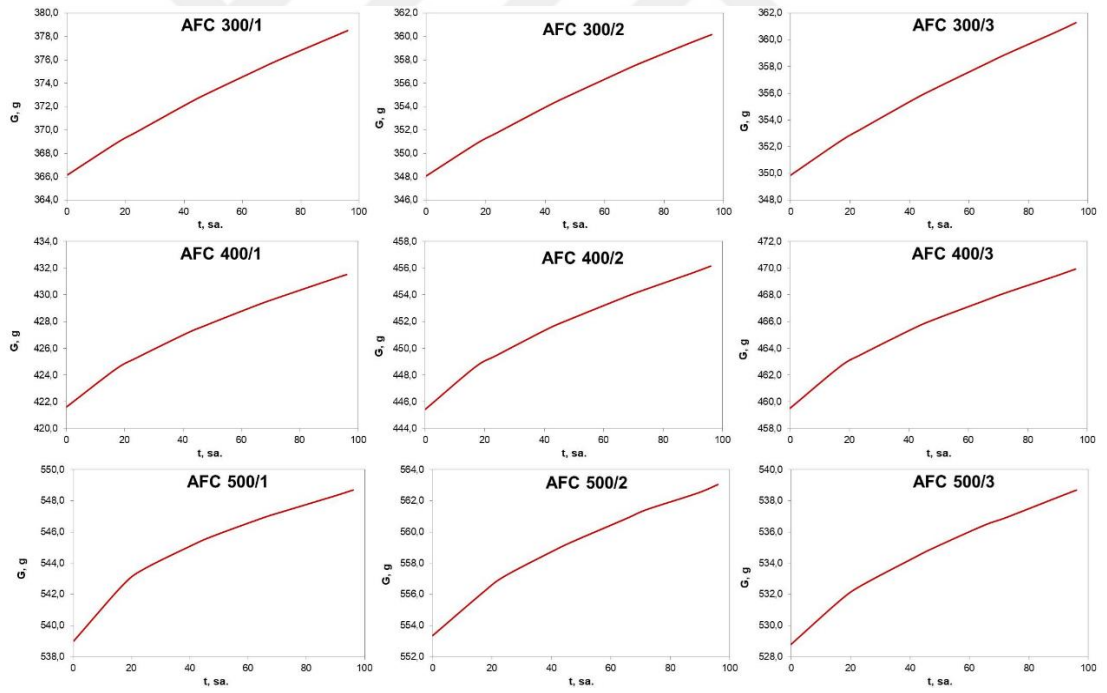
Süre t (saat)	Bağıl Nem φ (%)	Sıcaklık T (°C)	Atmosfer Basıncı P (hPa)	Numune Kütlesi (g)		
				M ₁	M ₂	M ₃
0.00	49.8	22.3	898	538.98	553.34	528.79
17.00				542.60	556.12	531.69
24.00				543.60	557.13	532.60
41.00				545.17	558.82	534.31
48.00				545.74	559.45	534.98
65.00				546.90	560.84	536.43
72.00				547.31	561.43	536.90
89.00				548.27	562.48	538.17
96.00				548.69	563.04	538.69
				Ort. ΔG/Δt	0.1011	0.1010

Sonuç olarak daha farklı yoğunluklara sahip FC ve AFC numunelerine özgü eğrilerde 20 ve 40 saat sonra dengeye gelmiş olduğu anlaşılmaktadır. Diğer belirtilmesi gereken bir husus su buharı akış hızları değişiminin otoklavlanmanın etkisiyle daha belirgin olduğudur. Otoklavlama özellikle 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklar için su buharı akış hızları değişimi üzerinde daha etkili olmuştur.

Havada kürlenmiş ve otoklavlanmış köpük beton numunelerinin zamana bağlı su buharı akış hızı grafikleri de Şekil 4.4 ve 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Havada kürlenmiş köpük beton numunelerinin su buharı akış hızları



Şekil 4.6. Otoklavlanmış köpük beton numunelerinin su buharı akış hızları

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri için alan, su buharı akımı, su buharı basınç farkı ve deney hücresindeki su buharı doygunluk basıncı değerleri Çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş numunelerin alan, su buharı akımı, doygunluk basınç farkları ve deney hücresindeki basınç değerleri verileri

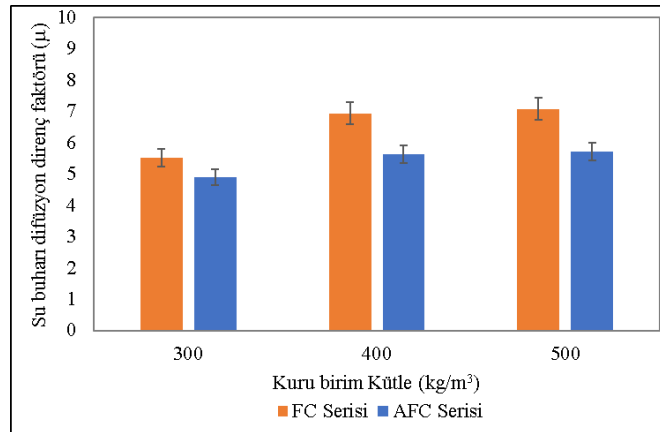
Seri	No	A	$\Delta G/\Delta t$	ΔP	P_{s1}	P_{s2}
FC300	1	0.0209	0.1283	1328	2868	0
	2	0.0211	0.1180			
	3	0.0210	0.1240			
FC400	1	0.0206	0.0852			
	2	0.0206	0.0918			
	3	0.0207	0.0852			
FC500	1	0.0206	0.0857			
	2	0.0206	0.0885			
	3	0.0206	0.0828			
AFC300	1	0.0208	0.1286			
	2	0.0209	0.1259			
	3	0.0207	0.1190			
AFC400	1	0.0208	0.1033			
	2	0.0208	0.1117			
	3	0.0207	0.1085			
AFC500	1	0.0208	0.1011			
	2	0.0208	0.1010			
	3	0.0207	0.1031			
A : Numune yüzey alanı, m ² $\Delta G/\Delta t$: Zamana bağlı su buharı akış hızındaki değişim, mg/h ΔP : Su buharı basınç farkı, Pa P_{s1} : Deney hücresindeki su buharı doygunluk basıncı, Pa P_{s2} : Nem çekici madde üzerindeki su buharı doygunluk basıncı, Pa						

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri için diğer su buhar difüzyonu ile ilgili özelliklere ilişkin değerler Çizelge 4.13’de toplu olarak verilmiş ve ayrıca su buharı difüzyon direnç faktörleri (μ) karşılaştırmalı olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) değerleri kürleme şartlarına bakılmaksızın yoğunluk artışıyla artan bir değişim göstermektedir. Ancak bu değişimin oranı 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklar için son derece küçüktür. Asıl değişimin yoğunluğun 300 kg/m³’ten 400 kg/m³’e yükseldiğinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Çizelge 4.13. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri için su buharı difüzyonu verileri

Seri	No	A	d	G	g	w	z	δ_{hava}	δ	μ	S_d
FC300	1	0.0209	0.0320	128.30	6132	4.45	0.22	0.80	0.14	5.608	0.179
	2	0.0211	0.0355	110.80	5260	3.82	0.26	0.80	0.14	5.902	0.209
	3	0.0210	0.0368	124.00	5908	4.29	0.23	0.80	0.16	5.060	0.186
	Ort.	0.0210	0.0348	121.03	5766	4.19	0.24	0.80	0.15	5.523	0.192
FC400	1	0.0206	0.0358	85.20	4133	3.11	0.32	0.79	0.11	7.104	0.254
	2	0.0206	0.0342	91.80	4455	3.35	0.30	0.79	0.11	6.900	0.236
	3	0.0207	0.0376	85.20	4116	3.10	0.32	0.79	0.12	6.802	0.255
	Ort.	0.0206	0.0359	87.40	4234	3.19	0.31	0.79	0.11	6.935	0.249
FC500	1	0.0206	0.0372	85.70	4153	3.13	0.32	0.79	0.12	6.808	0.253
	2	0.0206	0.0351	88.50	4307	3.24	0.31	0.79	0.11	6.950	0.244
	3	0.0206	0.0350	82.80	4020	3.03	0.33	0.79	0.11	7.471	0.261
	Ort.	0.0206	0.0358	85.67	4160	3.13	0.32	0.79	0.11	7.076	0.253
AFC300	1	0.0208	0.0393	128.60	6178	4.49	0.22	0.80	0.18	4.532	0.178
	2	0.0209	0.0365	125.90	6021	4.37	0.23	0.80	0.16	5.007	0.183
	3	0.0207	0.0373	119.00	5750	4.18	0.24	0.80	0.16	5.138	0.191
	Ort.	0.0208	0.0377	124.50	5983	4.35	0.23	0.80	0.16	4.892	0.184
AFC400	1	0.0208	0.0389	103.30	4968	3.61	0.28	0.80	0.14	5.701	0.221
	2	0.0208	0.0370	111.70	5360	3.89	0.26	0.80	0.14	5.545	0.205
	3	0.0207	0.0371	108.50	5236	3.80	0.26	0.80	0.14	5.672	0.210
	Ort.	0.0208	0.0376	107.83	5188	3.77	0.27	0.80	0.14	5.639	0.212
AFC500	1	0.0208	0.0377	101.10	4855	3.65	0.27	0.79	0.14	5.746	0.217
	2	0.0208	0.0386	101.04	4860	3.66	0.27	0.79	0.14	5.610	0.216
	3	0.0207	0.0367	103.13	4980	3.75	0.27	0.79	0.14	5.756	0.211
	Ort.	0.0208	0.0376	101.76	4898	3.69	0.27	0.79	0.14	5.704	0.215
A : Deney numunesinin etkiye maruz kalan (alt ve üst) alanların aritmetik ortalaması, d : Numune kalınlığı, m G : Deney numunesi kütleindeki değişim, mg/h g : Su buharı iletim debisi, mg/m²h w : Su buharı geçişi, mg/m².h.Pa z : Su buharı direnci, m².h.Pa/mg δ : Su buharı geçirgenliği, mg/ m².h.Pa δ_{hava} : Havanın su buharı geçirgenliği, mg/ m².h.Pa μ : Su buharı difüzyon direnç faktörü S_d : Su buharı geçirimsizlik direncine eşdeğer hava tabakası kalınlığı, m											



Şekil 4.7. FC-AFC serileri için su buharı difüzyon direnç faktörleri

Diğer taraftan otoklavlama tüm yoğunluklar için su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) değerlerinde bir miktar azalmaya neden olmuştur. Sonuç olarak, AFC serisinde FC serisine göre; 300 kg/m³ yoğunluk için %11.4, 400 kg/m³ yoğunluk için %18.7 ve 500 kg/m³ yoğunluk için ise %19.4'lük bir azalma ortaya çıkmıştır.

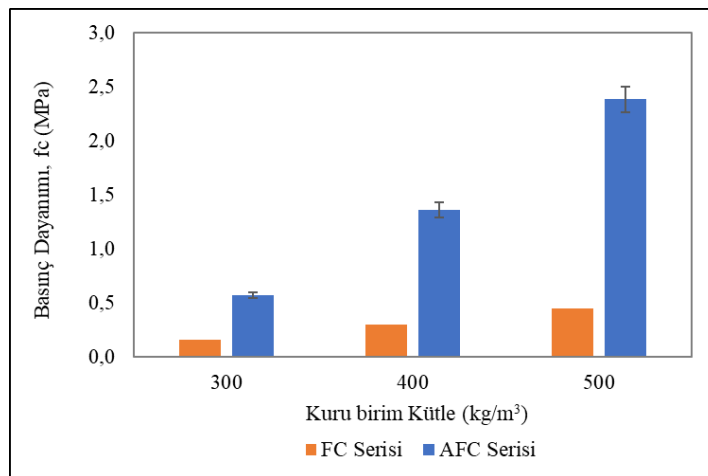
4.2.2. Mekanik özellikler

4.2.2.1. Eğilme ve basınç dayanımı

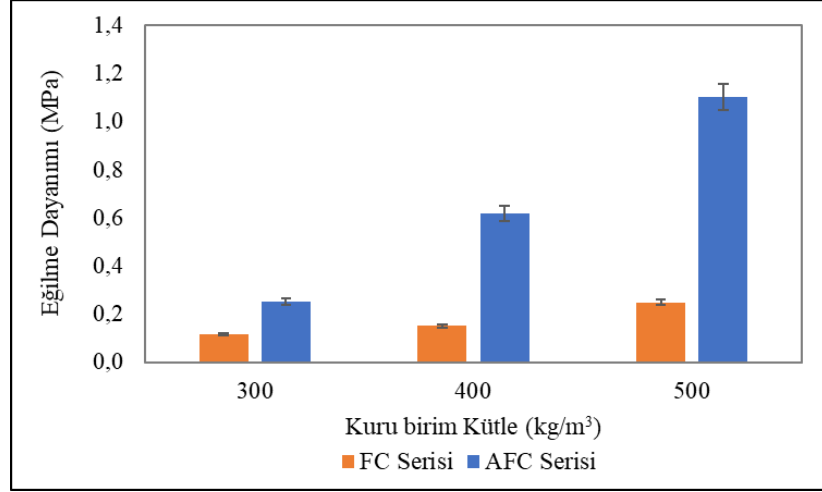
4.2.2.1.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri tek eksenli basınç dayanımları 0.16-2.39 MPa aralığında (Şekil 4.7) değişmektedir. FC serisi için 0.16, 0.31 ve 0.44 MPa olarak bulunan basınç dayanım değerleri AFC serisi için 0.54, 1.31 ve 2.39 MPa olarak belirlenmişlerdir. 0.12-1.10 MPa arasında değişen eğilme dayanımlarının ise FC serisi için 0.12, 0.15 ve 0.25 MPa ve AFC serisi için 0.25, 0.62 ve 1.10 MPa olarak gerçekleşmiştir (Şekil 4.8).

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük beton numuneleri artan yoğunlukla basınç ve eğilme dayanımları artmıştır. FC serisine göre AFC serisinde yoğunluğa bağlı basınç dayanımındaki artış oranları daha yüksektir. Eğilme dayanımları için de benzer bir değişiklik tespit edilmiştir.



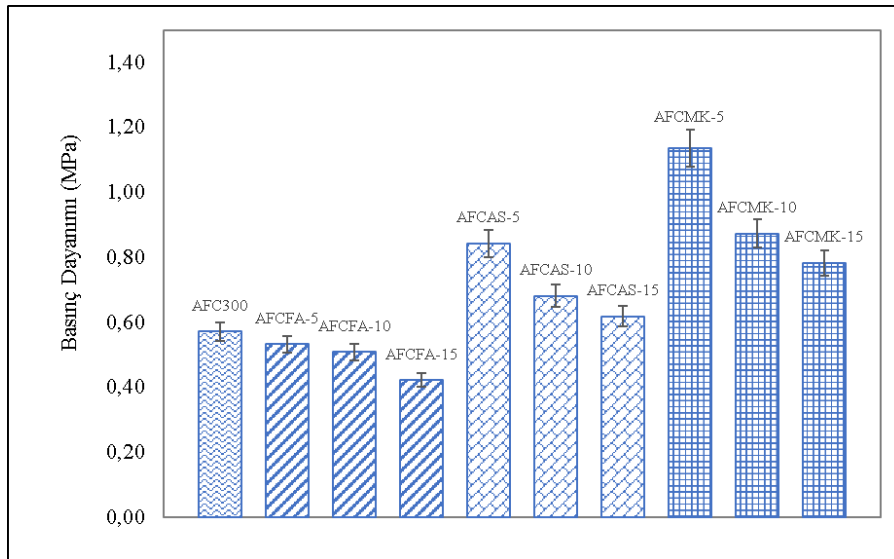
Şekil 4.8. FC ve AFC serileri için basınç dayanımları



Şekil 4.9. FC ve AFC serileri eğilme dayanımları

4.2.2.1.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar

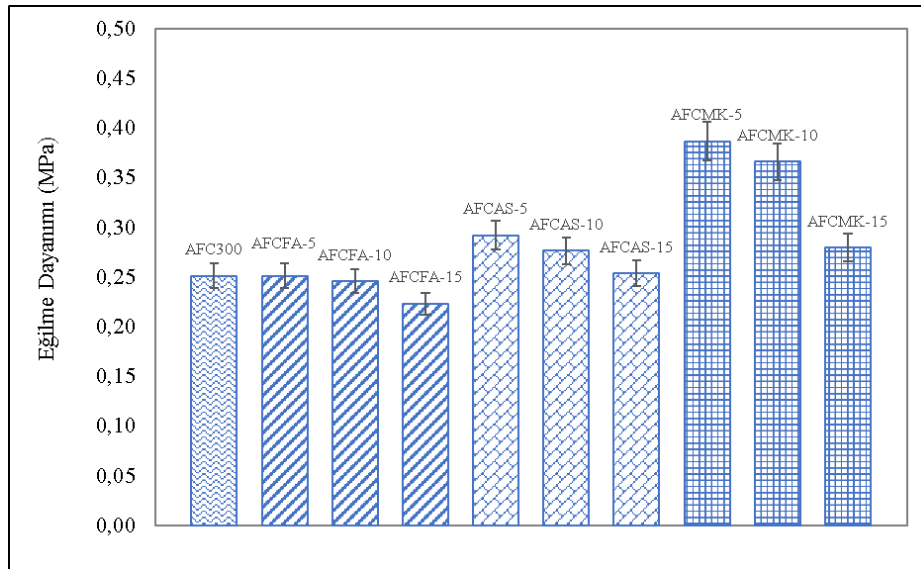
AFC300 numunesi temelinde mineral katkıların basınç dayanımı üzerine etkileri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Farklı mineral katkıların tüm serilerde basınç dayanımlarının 0.40-1.15 MPa arasında değiştiği belirlenmiştir. AFC300 köpük betonda uçucu kül kullanımı basınç dayanımının kontrol numunesine göre azalmasına yol açmıştır. En düşük basınç dayanımı değerleri uçucu kül en yüksek ise metakaolin içeren numunelerde elde edilmiştir. Tüm mineral katkıları için oranın artması basınç dayanımlarında düşüşe yol açmıştır.



Şekil 4.10. AFC300 mineral katkılı köpük beton serilerinin basınç dayanımları

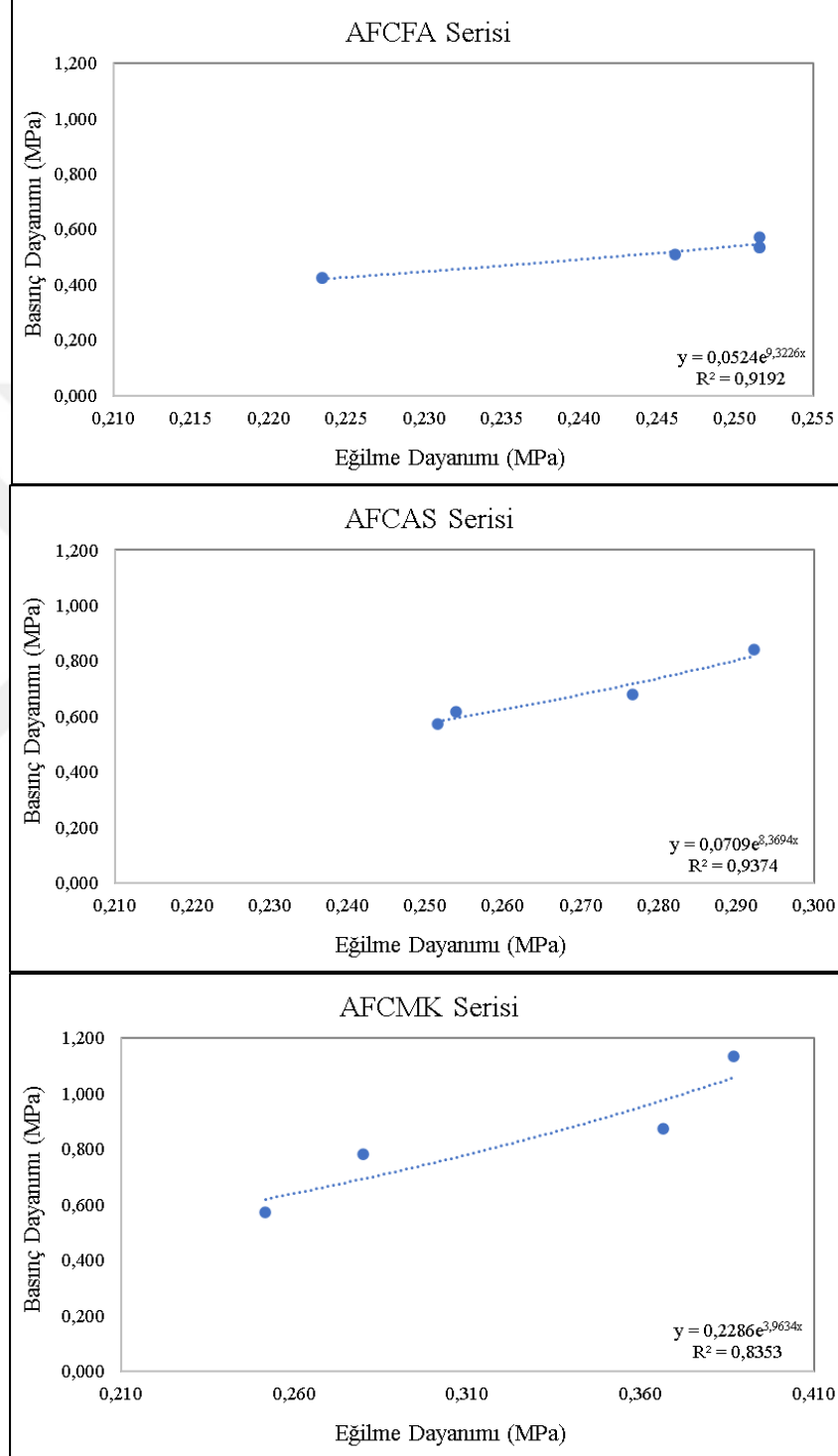
Ancak bu değişimde katkı-dayanım oranı ilişkisi farklılık göstermektedir. AFCFA serisi için 0.53, 0.51 ve 0.42 MPa olarak bulunan ve %5 ve %10 katkı oranları için farklılığın söz konu olmadığı basınç dayanımlarının, AFCMK serisinde 1.14, 0.87 ve 0.78 MPa’lık basınç dayanım değerleri ile %10 ve %15 katkı oranları için birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

AFC300 mineral katkılı köpük beton serilerinin eğilme dayanımları 0.21-0.4 MPa arasında belirlenmiştir (Şekil 4.11). AFCFA-15 köpük beton numunesi haricinde diğer tüm mineral katkılı AFC300 numunelerinin eğilme dayanımı değerleri kontrol numunesine göre daha yüksektir. Mineral katkı maddelerinin etkinlikleri uçucu kül<amorf silika<metakaolin olarak sıralanmıştır. Tüm mineral katkı maddeleri için %5 ve %10’luk kullanım oranlarında küçük farklılıklar gözlenmiş, asıl değişimin %15’lik kullanım oranlarında gerçekleşmiştir. Sonuç olarak söz konusu katkı oranları için AFCFA serisinde 0.25 ve 0.24 MPa, AFCAS serisinde 0.29 ve 0.28 MPa ve AFCMK serisinde 0.39 ve 0.37 MPa olarak bulunan eğilme dayanımı değerleri en yüksek katkı kullanım oranı için 0.22, 0.24 ve 0.28 MPa olarak elde edilmiştir. Yine bu değişim, mineral katkıları arasında en fazla AFCMK serisi için gerçekleşmiştir. Ayrıca %15 metakaolin ve %10 amorf silika katkıları için, eğilme dayanımları birbirine yakındır.



Şekil 4.11. AFC300 mineral katkılı köpük beton serilerinin eğilme dayanımları

Mineral katkılı köpük beton serileri için basınç- eğilme dayanımı ilişkileri Şekil 4.12’de verilmiştir. Söz konusu ilişkilere özgü belirleme katsayıları (R^2) 0.8353- 0.9374 aralığında değişmektedir.

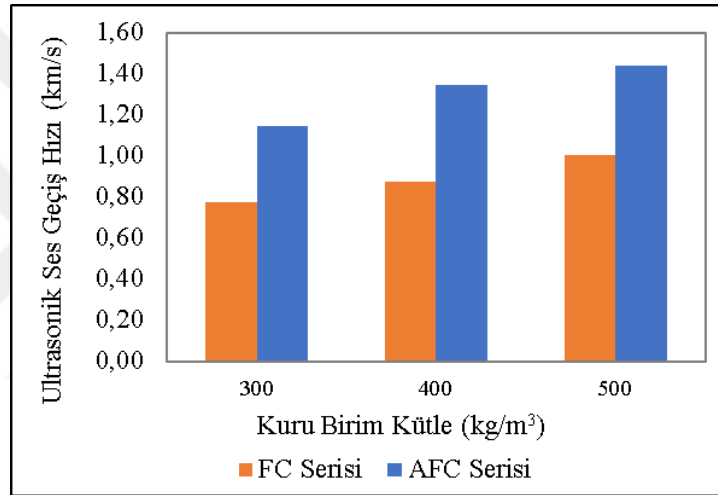


Şekil 4.12. Basınç-eğilme dayanımı ilişkisi

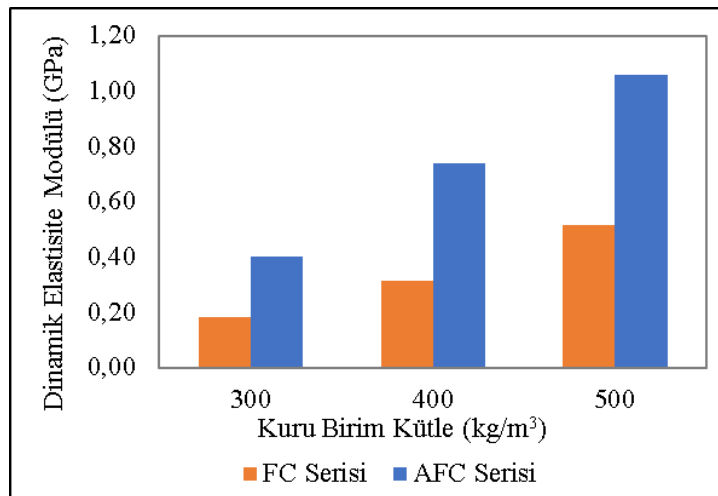
4.2.2.2. Ultrasonik ses hızı ve dinamik elastisite modülü

4.2.2.2.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş farklı yoğunluklardaki köpük beton numuneleri için Şekil 4.13’de verilen ultrasonik ses geçiş hızlarının FC ve AFC serileri için değerlendirilmesi; kütleme yöntemi farklılığının yoğunluk artışına göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak ultrasonik ses geçiş hızları FC serisi için 0.772, 0.875 ve 1.006 km/s ve AFC serisi için ise 1.147, 1.347 ve 1.439 km/s olarak belirlenmişlerdir.



Şekil 4.13. FC ve AFC serileri için ultrasonik ses geçiş hızları



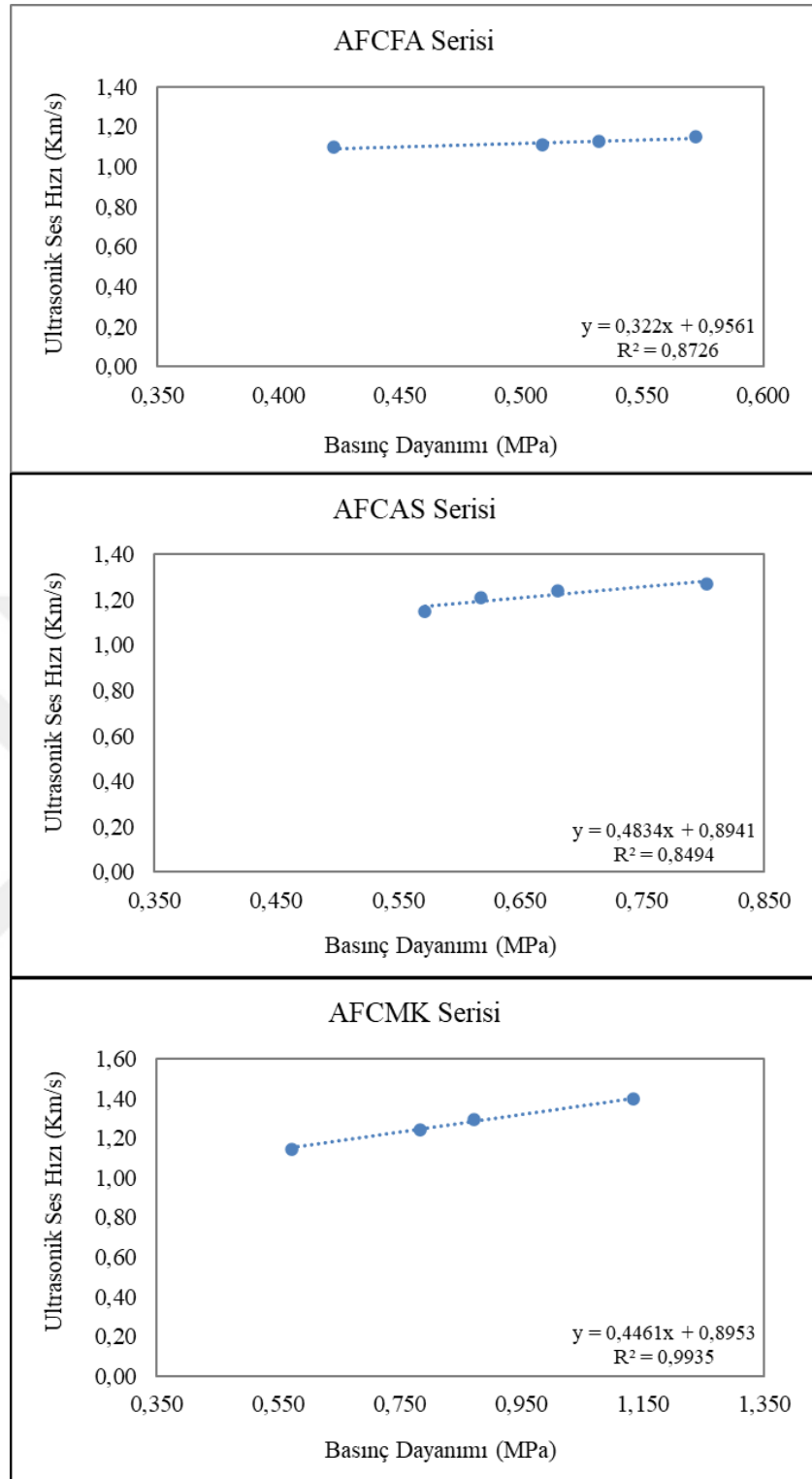
Şekil 4.14. FC ve AFC serileri için dinamik elastisite modülleri

Farklı yoğunluklardaki köpük beton numuneleri için belirlenen dinamik elastisite modülleri Şekil 4.14.'de verilmiştir. FC serisi için 0.182- 0.516 GPa arasında değişen dinamik elastisite modülü değerleri AFC serisi için 0.402- 1.06 GPa aralığında bulunmuştur. Yoğunluk artışı kürleme yöntemi farklılığına bakılmaksızın dinamik elastisite modüllerinin artmasına yol açmıştır. Diğer taraftan otoklavlanmanın, dinamik elastisite modülü değerlerinin yaklaşık ~2 kat artmasına ve yine yoğunluğa bağlı değişimin de anlamlı olarak artmasına neden olmuştur.

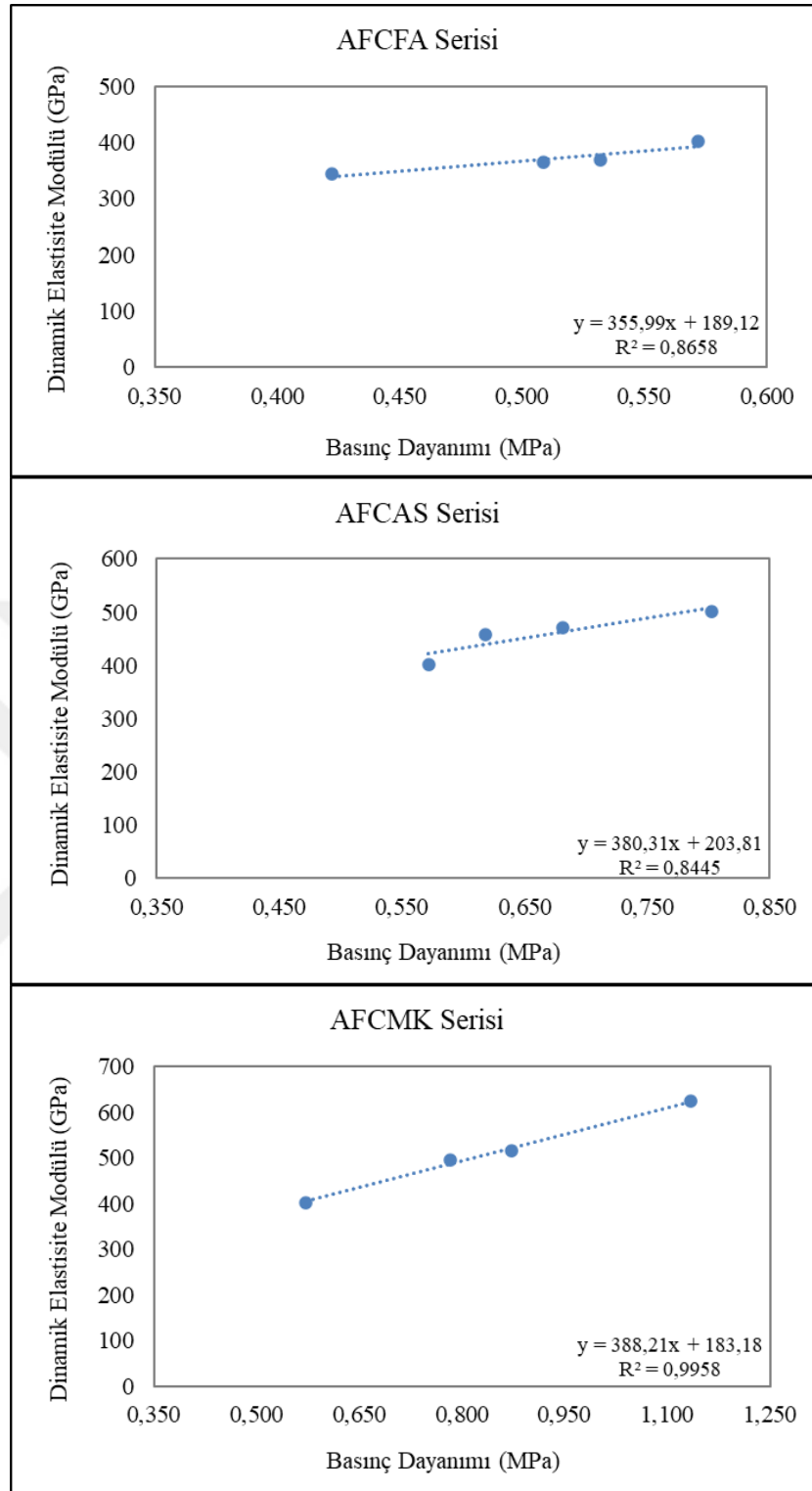
4.2.2.2.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar

Otoklavlanmanın farklı mineral katkıların AFC300 serilerinde ultrasonik ses geçiş hızı-basınç dayanımı ilişkileri üzerine etkileri AFC300 temelinde Şekil 4.15'de gösterilmiştir. AFCFA serisi için 1.10-1.13 km/s, AFCAS serisi için 1.21-1.27 km/s ve AFCMK serisi için 1.24-1.40 km/s aralığında değişen ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinin basınç dayanımı artışıyla arttığı gözlenmiştir. En büyük farklılık %5 uçucu kül ve %15 metakaolin katkılı otoklavlanmış köpük beton numuneleri arasında elde edilmiştir.

Farklı mineral katkılı AFC300 serilerinde dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkileri üzerine etkileri ise Şekil 4.16'da gösterilmiştir. AFCFA serisi için 0.344- 0.369 GPa, AFCAS serisi için 0.457- 0.502 GPa ve AFCMK serisi için 0.495- 0.624 GPa aralıklarında değişen dinamik elastisite modülü değerlendirildiğinde en düşük artışların uçucu kül en yüksek artışların ise metakaolin katkılarında gerçekleştiği belirlenmiştir. Dinamik elastisite modülü -basınç dayanımları ilişkileri için yüksek belirleme katsayıları ($R^2 = 0.8445 - 0.9958$) elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Ultrasonik ses hızı-basınç dayanımı ilişkisi

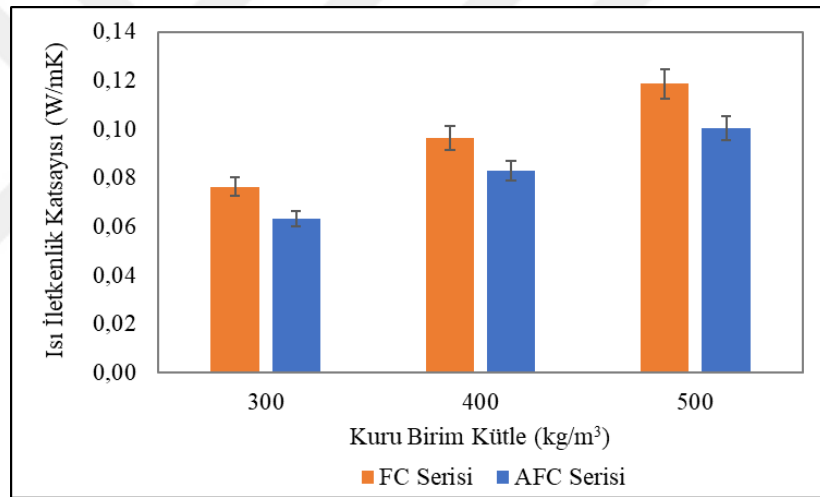


Şekil 4.16. Dinamik elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi

4.2.3. Termal özellikler

4.2.3.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

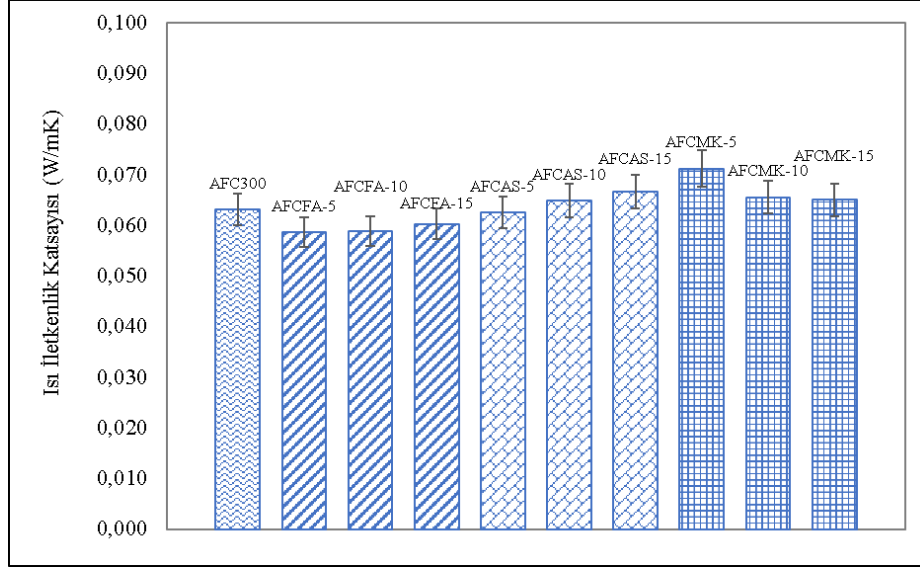
Farklı kürleme yöntemlerinin köpük beton ısı iletkenlik katsayısı üzerine etkileri Şekil 4.17'da gösterilmiştir. Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları FC serisi için 0.076- 0.119 W/mK ve AFC serisi için 0.063- 0.101 W/mK aralıklarında değişmektedir. Isı iletkenlik katsayılarının kürleme yöntemi farklılığına bakılmaksızın yoğunluk artışıyla arttığı gözlenmiştir. Diğer taraftan otoklavlamanın tüm yoğunluklar için daha düşük ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin elde edilmesine yol açtığı belirlenmiştir. Nitekim AFC serisi için bulunan ısı iletkenlik değerleri FC serisine göre, artan yoğunlukla yaklaşık %14, %15 ve %17 seviyelerinde azalmıştır.



Şekil 4.17. FC ve AFC serileri için ısı iletkenlik katsayıları

4.2.3.2. Otoklavlanmış mineral katkıli köpük betonlar

Farklı tür ve oranlarda mineral katkı kullanımına yer verilen AFC300 köpük beton serileri için ortalama ısı iletkenlik katsayıları Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



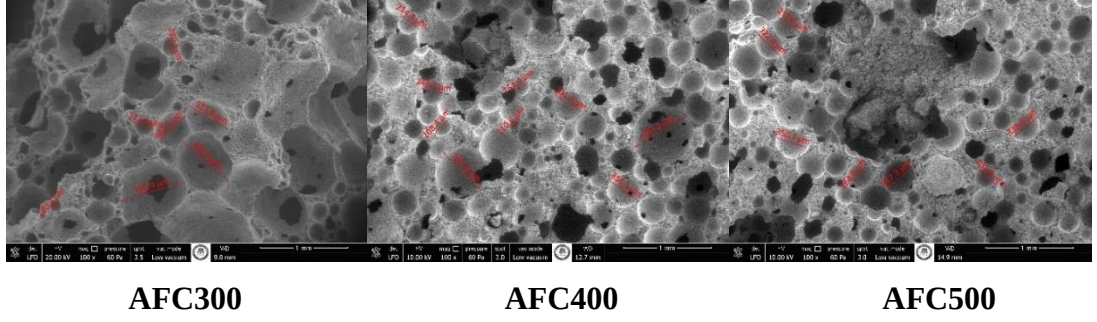
Şekil 4.18. Otoklavlanmış mineral katkılı AFC300 serileri ısı iletkenlik katsayıları

Isı iletkenlik katsayıları 0,059- 0,060 W/mK aralığında bulunan AFCFA serisi değerleri AFC300 kontrol numunesine göre daha düşüktür. Yani artan uçucu kül katkısı ısı iletkenlik katsayısında artışa yol açmakla birlikte %15'e değin tüm katkı oranları için ısı iletkenlik katsayıları kontrol numunesine göre daha küçüktür. Diğer mineral katkıları için; ısı iletkenlik katsayıları AFCAS serisinde 0,063- 0,067 W/mK ve AFCMK serisinde 0,065- 0,071 W/mK aralıklarında değişmiştir. Amorf silika ve metakaolin kullanımı genel olarak ısı iletkenlik katsayısının AFC300 kontrole göre yükselmesine yol açarken diper mineral katkıların tam tersine metakaolin kullanım oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı azalmıştır.

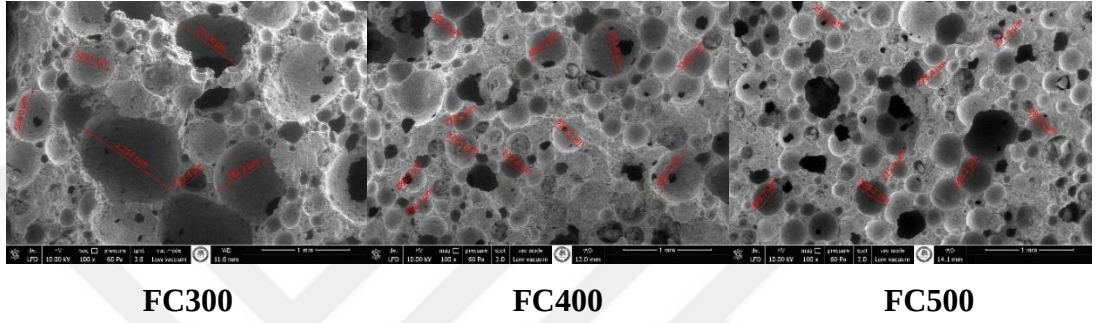
4.2.4. Yapısal ve mineralojik analizler

4.2.4.1. Yapısal özellikler

Farklı kürlenme yöntemlerinin farklı yoğunluklardaki köpük betonların gözenek yapısı üzerine etkilerine ilişkin SEM analiz verileri Şekil 4.19 ve 4.20'da verilmiştir. FC serisi için ortalama gözenek çapları yoğunluk artışına bağlı olarak 461, 324 ve 315 μm şeklinde bir değişim gösterirken AFC serisi için de 585, 387 ve 298 μm olarak aynı yönlü bir değişim gözlenmiştir. Ayrıca, AFC serisinde gözenek büyüklük dağılımı FC serisine göre daha üniormdur. Bu farklılığın havada kürlenmenin

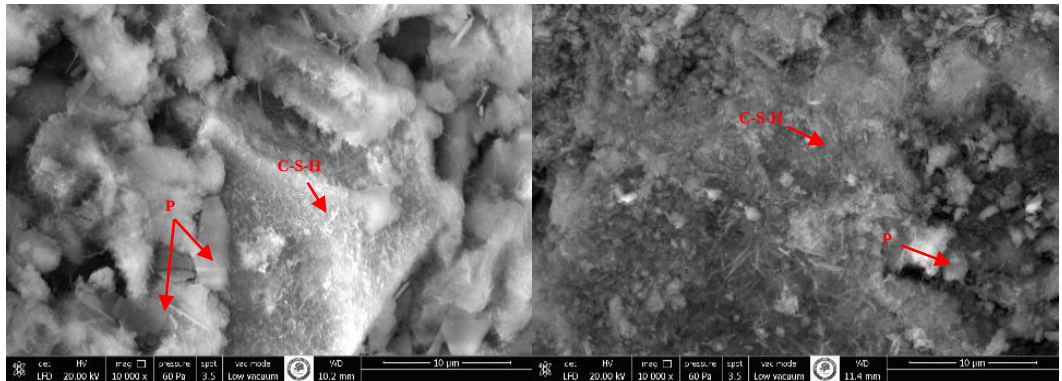


Şekil 4.19. FC Serisi havada kürlenmiş köpük beton SEM görüntüleri (x100)



Şekil 4.20. AFC Serisi otoklavlanmış köpük beton SEM görüntüleri (x 100)

düşük hidratasyon derecesi nedeniyle köpüğün stabilitesini kaybetmesi ve daha fazla açık gözenek oluşumuna yol açmasıyla ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Oysa otoklavlama silikat faz kristallerinin boyut olarak büyümesi yanında bağlayıcı hidratasyon ürünlerinin kuvars tanelerini kaplaması ve gözenekleri doldurmasına ve daha fazla miktarda kalsiyum hidroksitlerin kristal tabaka benzeri hücreler şeklinde birikimli bir yapının oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 4.21).

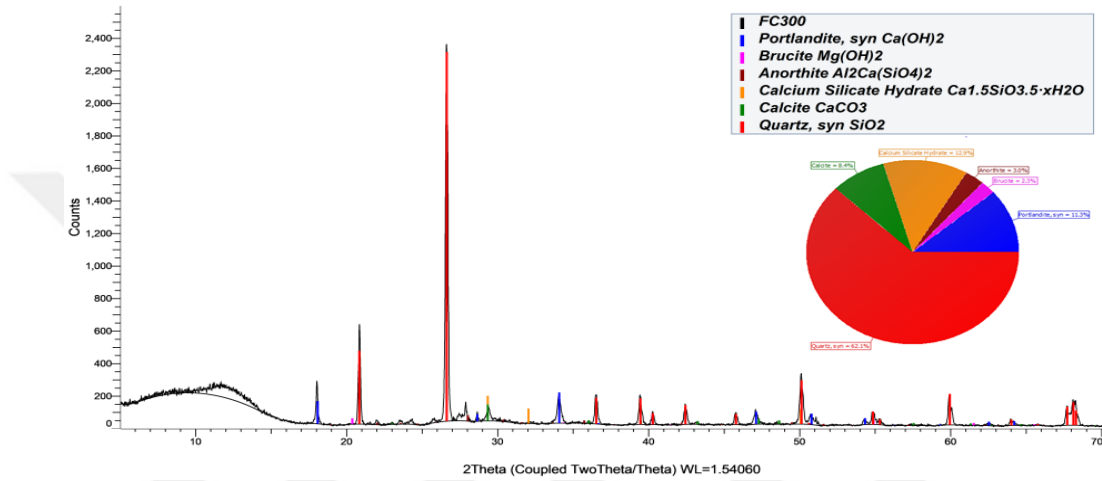


Şekil 4.21. FC ve AFC numunelerinin mikroyapı görüntüleri (x 10.000)

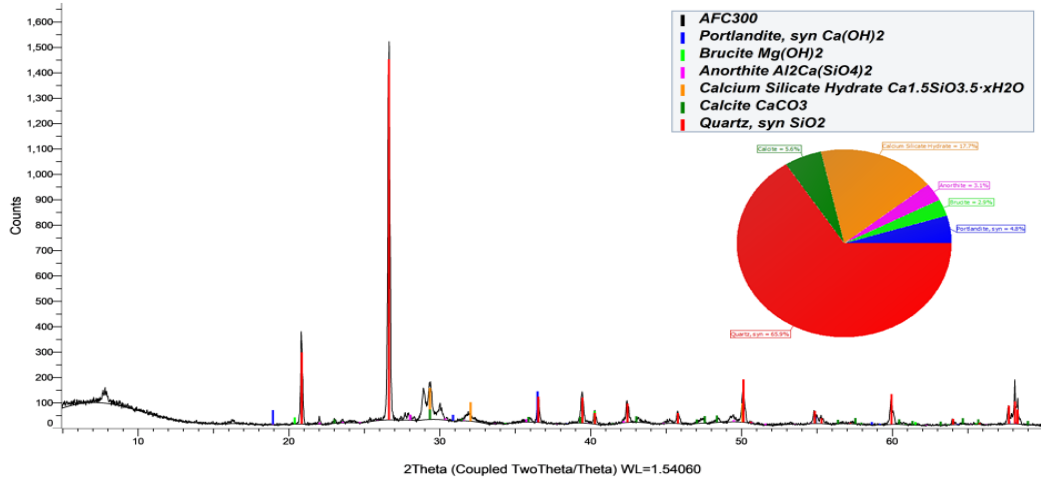
4.2.4.2. Hidratasyon ürünleri mineralojik özellikler

4.2.4.2.1. Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlar

Farklı kürleme yöntemlerinin 300 kg/m³ yoğunluktaki köpük beton hidratasyon ürünleri mineralojik özellikleri üzerine etkileri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'te verilen XRD verileri kapsamında değerlendirilmiştir.



Şekil 4.22. FC300 köpük beton XRD analiz verileri



Şekil 4.23. AFC300 köpük beton XRD analiz verileri

Söz konusu köpük beton için hidratasyon ürünlerini asıl olarak tobermorit, portlandit, brusit, anortit, kalsit, kuvars ve bazı mineraller oluşturmaktadır.

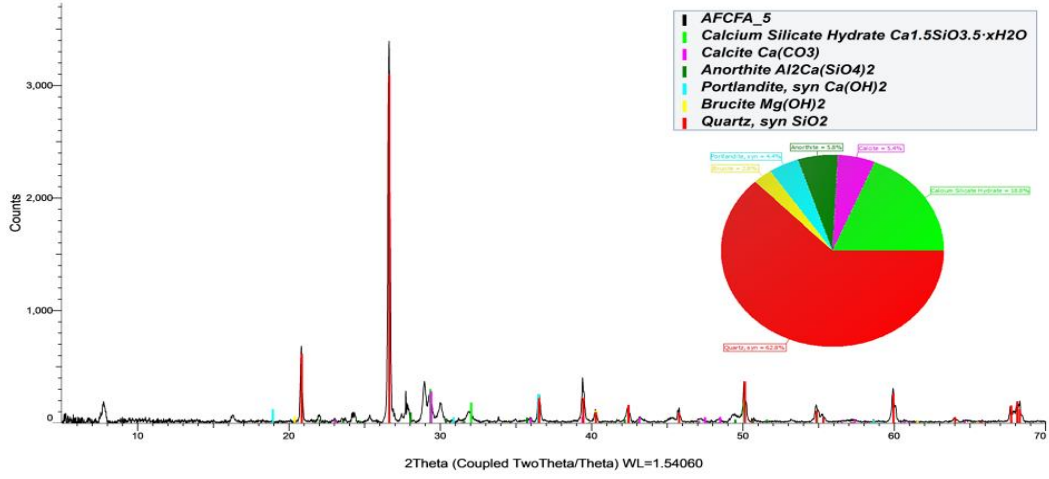
Aynı bileşime sahip FC300 ve AFC300 köpük betonlar için C-S-H bağlarındaki farklılık otoklavlanmanın etkisini göstermektedir. FC300 ve AFC300 köpük betonlar için kalsit, portlandit ve tobermorit yoğunluk farklılıkları bu değişimi açıklar niteliktedir. Nitekim hidrotermal reaktif süreçte SiO_2 'in, tobermorit oluşturmak üzere kalsiyumoksitli malzemeyi tüketimi söz konusudur ve otoklavlama bunu artırmıştır.

4.2.4.2.2. Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar

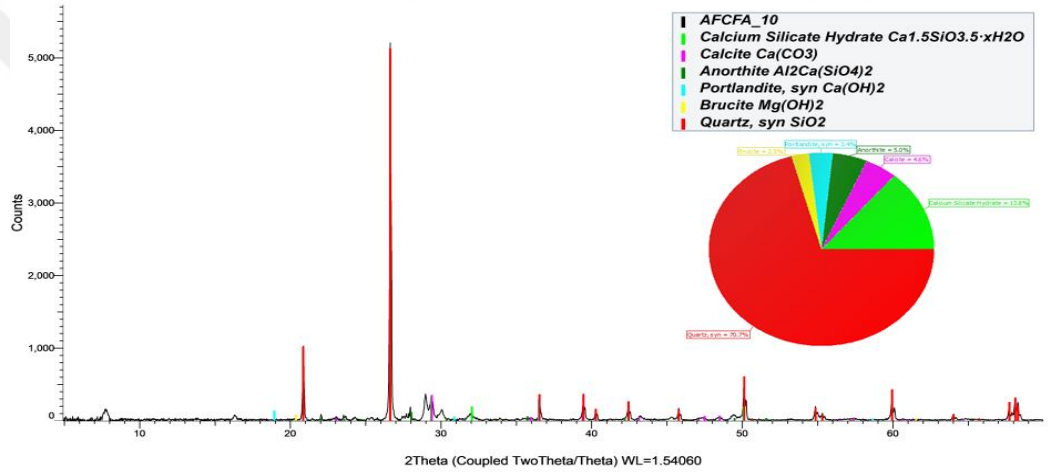
Otoklavlanmış AFC300 köpük beton için mineral katkı ikamelerinin hidrasyon ürünleri mineralojik özellikleri üzerine etkileri XRD verileri kapsamında Şekil 4.24-4.32 aralığında gösterilmiştir.

AFCFA, AFCAS ve AFCMK serileri arasındaki SiO_2 zirve yoğunluklarındaki farklılıkların gerçekte çok anlamlı olmadığı ve bunun tobermorit ve anortit minerallerinin içerdiği Si ve dolayısıyla mineral katkıların kullanım oranlarına bağlı silika içeriği farklılıklarıyla ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Söz konusu mineral katkıların kullanım oranlarına göre; AFCFA ve AFCAS serileri için %5'lik kullanım oranlarında daha yüksek tobermorit zirve yoğunlukları gözlenirken, AFCMK serisi için en düşük zirve yoğunluğu elde edilmiştir.

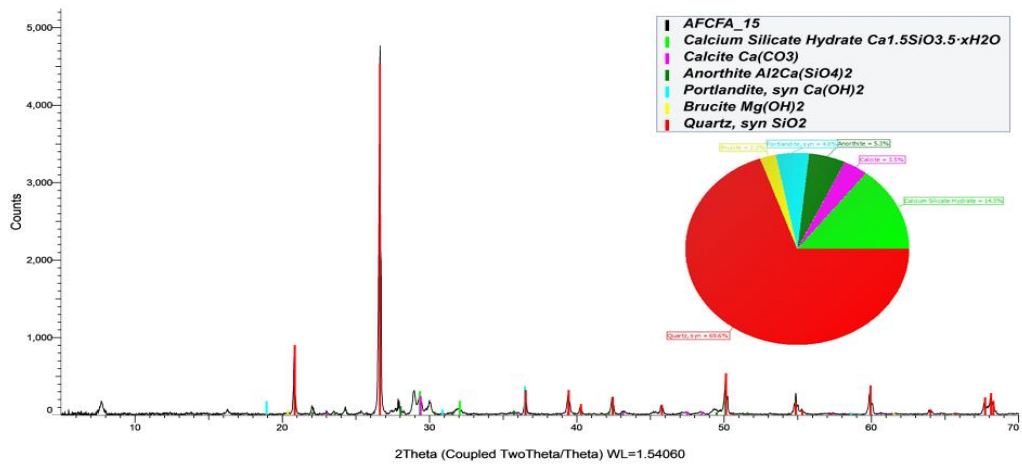
Mineral katkıların kullanım oranlarına bağlı hidrasyon ürünleri zirve yoğunluklarının değişimlerinde, analiz numunelerinin çok küçükte olsa heterojenliği ve söz konusu minerallerin kimyasal içerik farklılıklarının etkili olduğu değerlendirilmiştir. Nitekim uçucu kül, metakaolinle yaklaşık düzeyde SiO_2 içerirken, yarıya yakın Al_2O_3 ve daha fazla Fe_2O_3 , CaO ve MgO içermektedir (Çizelge 4.3). Ek olarak amorf silika içeriğini ise neredeyse tamamen SiO_2 oluşturmaktadır. Dolayısıyla diğer hidrasyon ürünleri brunit ve anortit zirve yoğunluklarında da farklılıklar söz konusudur.



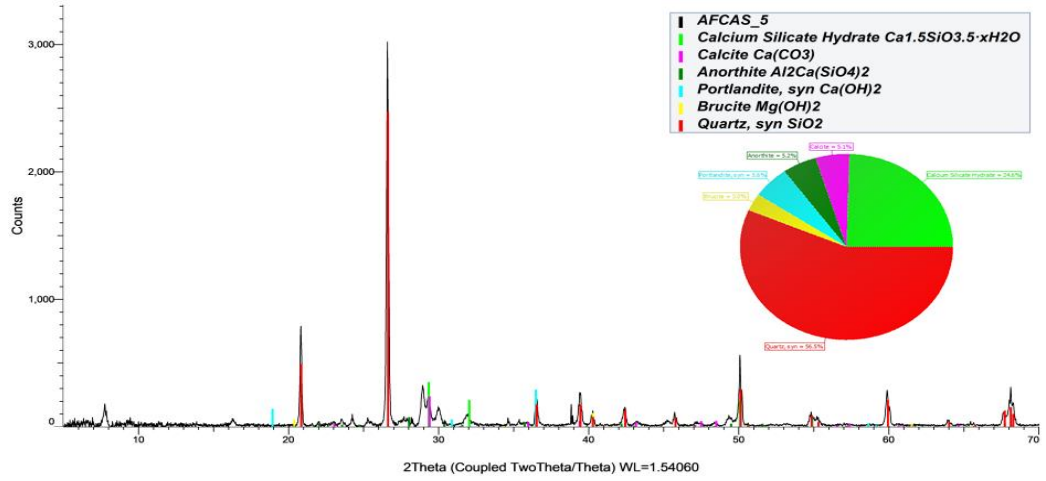
Şekil 4.24. AFCFA-5 köpük beton XRD analiz verileri



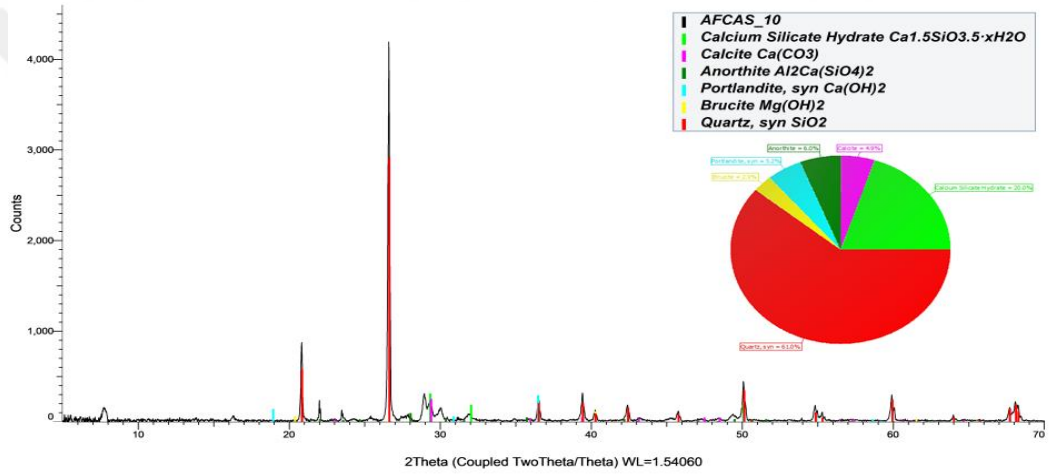
Şekil 4.25. AFCFA-10 köpük beton XRD analiz verileri



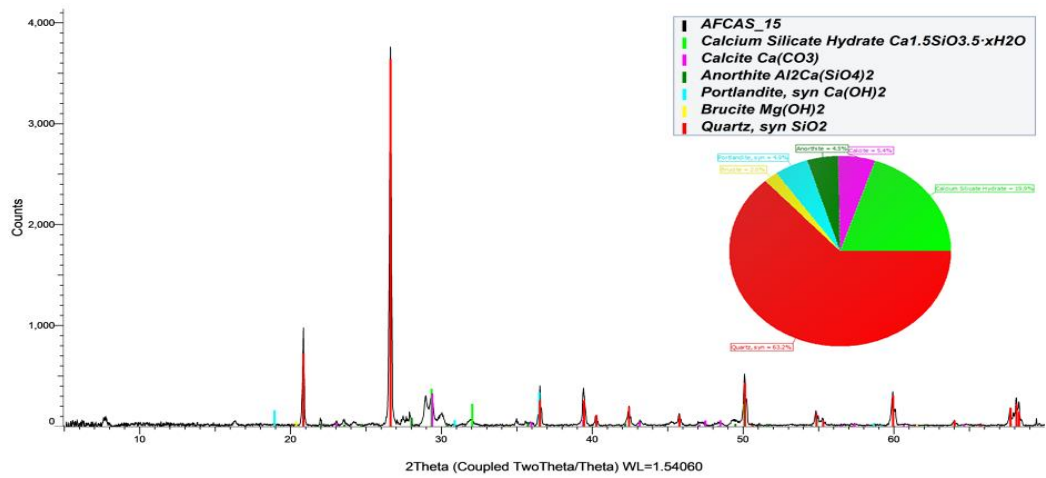
Şekil 4.26. AFCFA-15 köpük beton XRD analiz verileri



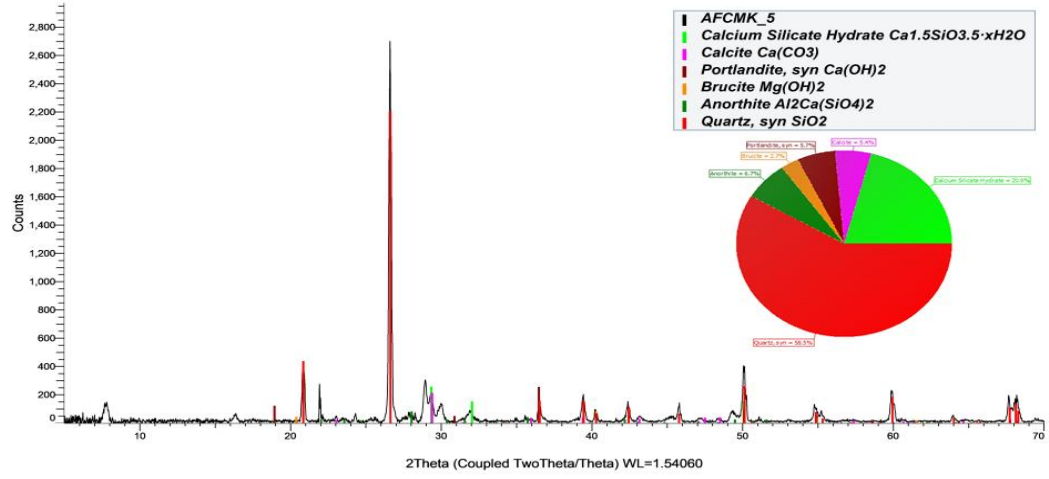
Şekil 4.27. AFCAS-5 köpük beton XRD analiz verileri



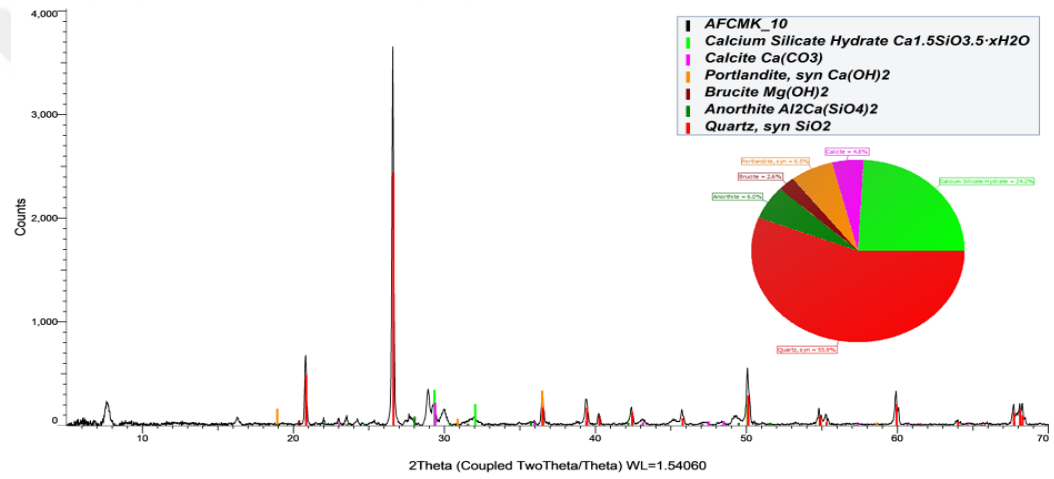
Şekil 4.28. AFCAS-10 köpük beton XRD analiz verileri



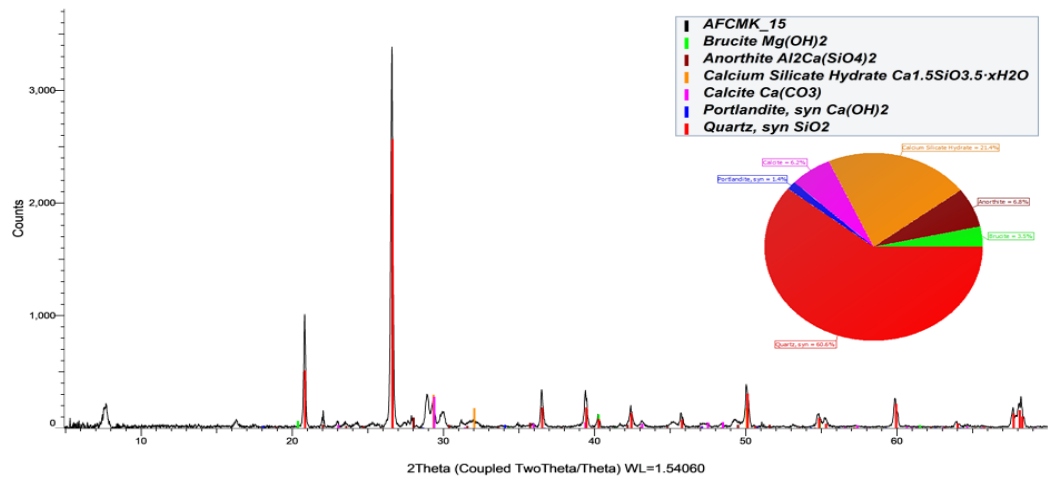
Şekil 4.29. AFCAS-15 köpük beton XRD analiz verileri



Şekil 4.30. AFCMK-5 köpük beton XRD analiz verileri



Şekil 4.31. AFCMK-10 köpük beton XRD analiz verileri



Şekil 4.32. AFCMK-15 köpük beton XRD analiz verileri

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Dünya’da ve Türkiye’de ticari bir ürün olarak istenilen standartları sağlayan bir otoklavlanmış köpük beton ve konuyla ilgili bilimsel çalışmaların yokluğu bu çalışmanın temelini oluşturmuştur. Bu tez çalışmasında, otoklavlamanın ve amorf silika, metakaolin ve F sınıfı uçucu kül mineral katkılarının etkileri araştırılmış ve 100- 400 kg/m³ kuru yoğunluk, düşük rötre değeri, ≥ 1 MPa basınç dayanımı, ≤ 0.065 W/mK ısı iletkenlik katsayısı ve yangına karşı dirence sahip köpük beton eldesi hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamı iki aşamalıdır. İlk aşamada farklı yoğunluklarda (300, 400 ve 500 kg/m³) ve kürleme şartlarında (havada ve otoklavda) elde edilen köpük beton özellikleri karşılaştırılmıştır. İkinci aşamada ise hedeflenen özelliklere sahip köpük beton eldesine uygun bulunan 300 kg/m³ yoğunluk için çimento ile ikame edilen farklı mineral katkıların artan oranlardaki kullanımlarının otoklav ile kürleme şartlarında etkileri araştırılmıştır.

300, 400 ve 500 kg/m³ yoğunluklarda tasarlanan köpük betonlarda; havada kürlenmiş ve otoklavlanmış köpük beton serileri için belirlenen kuru yoğunluk farklılıkları, otoklavlamanın yoğunlukta azalmaya etki etmediğini ortaya koymuştur. Farklı mineral katkı ve oranları için otoklavlanmış köpük betonların kuru yoğunluklarında, muhtemelen daha yüksek özkütleyle sahip çimento ile ikamenin neden olduğu bir azalma eğilimi söz konusudur. Yine farklı mineral katkı kullanımlarıyla ilişkili olarak kuru yoğunlukların en yüksek metakaolin en düşük ise uçucu küle özgü olması, mineral katkıların özkütleleri arasındaki farklılığın (2.72 ve 2.05 g/cm³) bir yansımasıdır. Farklı mineral katkılar için neden olarak gösterilen bu farklılığın, aynı mineral katkı oranları için teorik olarak beklenmesi gerekir ise de oran farklılıklarının düşüklüğü buna imkân vermemiştir. Dolayısıyla mevcut çalışma bulguları, bir kısım araştırmacıların (He vd., 2019; Peng vd., 2022; Yuan vd., 2022) da belirttiği taze yoğunluk, tasarlanan yoğunluk ve kuru yoğunluk arasında tutarlılık ve kabul edilebilir düzeylerdeki farklılıklar kapsamında değerlendirilmelidir.

Köpük betonda, tasarım bileşenlerine bağlı olarak normal betona göre daha fazla gerçekleştiği kabul edilen kuruma büzülmesinin, çok büyük oranda harç dökümü

sonrası ilk dönemde gerçekleştiği bilinmektedir (Amran vd., 2015, Sun vd., 2018). Bu kapsamda; çalışmada farklı şekilde kürlenene numunelerin ilk 3 ay için 7 ve sonraki 3 ay için ise 15 gün zaman aralıklı kuruma büzülmesi oranlarının değişimleri, otoklavlanmanın bariz etkisini yansıtmaktadır. İlk 3 ay büyük ölçüde kuruma büzülmesi yapan havada kürlenmiş olan köpük beton, ilerleyen dönem itibarıyla nispeten düşük oranda bir kuruma büzülmesi sergilemiştir. Ayrıca otoklavlama, köpük beton yoğunluğu- kuruma büzülmesi ilişkisinin daha çarğıcı bir şekilde belirlenmesini sağlamıştır. Köpük beton için otoklav kürlenmesi etkilerine ilişkin bulguların yetersizliğı söz konusudur. Bu kapsamda yapılan bazı çalışmalarda; Shin vd. (2011)'ne göre hafif köpük beton için havada kürlenme sıcaklık ve süre artışı daha hızlı hidratasyona yol açtığı, Abd Elrahman vd. (2021)'ne göre ultra hafif köpük betonda (350 kg/m^3 etüv kurusu yoğunluk) nanosilika kullanımının erken yaşta daha yüksek olan kuruma büzülmesinin 28. günde azalmasını sağladığı ve Yuan vd.(2022)'ne göre ise artan kireç çamuru ve uçucu kül numunelerinin köpük beton kuruma büzülmesini azalttığı ve %0 ve 50 dozları için %23'lük bir azalış kaydedildiğı bildirilmiştir.

Kapiler su emme katsayıları için kürlenme yöntemine bakılmaksızın artan köpük beton yoğunluğu ile artma eğilimi havada kürlenme şartlarında daha belirgindir. Otoklavlanmanın, kapiler su emme katsayılarında artan köpük beton yoğunlukları için %32- 40 aralığında değişen düşüşlere açmıştır. Mineral katkılı otoklavlanmış köpük betonlarda kapiler su emme katsayılarının uçucu külün %5 ve %10'luk numuneleri haricinde kontrol numunesine göre yüksekliğı, amorf silika ve özellikle metakaolin katkılarının kapiler su emme katsayısını artırma etkisini yansıtmaktadır. Gökçe vd. (2019), $873- 1998 \text{ kg/m}^3$ yoğunluğa sahip köpük betonların su absorpsiyonu üzerine kür rejimi (7 ve 28 günlük standart kür ve otoklav kürü) ve su kürü süresinin etkilerine ilişkin değerlendirmelerinde; kullanılan mineral katkılardan silis dumanının kür rejiminden bağımsız olarak su emme değerlerinde düşüşe neden olduğı, uçucu kül etkisinin ise dalgalı (artan ve azalan) bir özellik sergilediğı belirtilmiştir.

Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlarda yoğunluk artışı, su buharı akımının azalmasında ve dolayısıyla su buharı difüzyon direnç faktörü (μ)'nün artmasında etkilidir. Söz konusu özelliklere ilişkin değişimlerin, yoğunluğun 300

kg/m³'ten 400 kg/m³'e yükseldiği şartlarda son derece belirgin ve sonrasında düşük seviyelerde gerçekleşmiş olması, esasen yoğunluk için kritik noktanın bu değerler arasında olduğunun bir göstergesidir. Nitekim su buharı akış hızının zamana bağlı değişimleri incelendiğinde, kürlenme şartlarına bakılmaksızın ilk 20 saatlik süreye göre ortaya çıkan azalma seviyesi değişimleri de bu değerlendirmeleri destekler niteliktedir. Otoklavlama, köpük beton yoğunluklarındaki artışa bağlı olarak su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) değerlerinde %11.4, 18.7 ve 19.4 oranlarında düşüşe neden olmuştur.

Köpük beton yoğunluk artışı, kürlenme yönteminden bağımsız olarak basınç ve eğilme dayanımlarını pozitif yönde etkilemektedir. Her iki kürlenme yöntemi ve dayanım özellikleri için değişim oranları, otoklavlama etkisinin yoğunluğa göre çok daha fazla olduğunun bir göstergesidir. Ayrıca havada kürlenmeye göre basınç dayanımlarında % 237.5- 443.2 ve eğilme dayanımlarında % 108.33- 340 aralığında değişen artış yüzdeleri, otoklavlamanın açık bir avantajını ortaya koymaktadır. Kütlece %75 kaolinit kil ve %25 Portland çimentosu ve % 0.2- 8 aralığında değişen oranlarda köpürtücü ajan olarak alüminyum tozunun kullanıldığı otoklavlanmış hücreli betonda daha düşük mekanik dayanım (maksimum 0.62 MPa) daha yüksek alüminyum içeriği ile ilişkilendirilmiştir (Guglielmi vd., 2010). Otoklavla kürlenmenin ekstrüzyon beton panellerin sağlamlığını etkilediğini belirten Kim vd. (2017), atık beton tozunun, otoklav kürü sırasında SiO₂ kaynağı ve dolgu maddesi olarak görev yapan silika tozuyla ikame oranı arttıkça dayanımın azaldığı ancak %50 seviyesi için istenilen 14 MPa'lık dayanım gereksinimini karşıladığı bildirilmiştir. Diğer taraftan dış duvar yalıtımında kullanılmak üzere nehir tortusu ve genleşmiş polistiren katkılı düşük karbonlu ultra hafif köpük beton için SEM verileri, genleşmiş polistiren partikülleri ve alkali ile aktive edilmiş metakaolin-nehir tortu macunu arasındaki uyumluluğu doğrulamış ve bileşimde söz konusu materyallerin artmasıyla dayanım azalmıştır (Shi vd., 2021). Bu çalışmada da çimento ile ikame edilen uçucu kül, amorf silika ve metakaolinin katkı oranlarındaki artış gerek basınç ve gerekse eğilme dayanımlarında düşüşe yol açmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları değerlendirildiğinde mineral katkı türleri arasında en düşük sonuçlar uçucu kül ve en yüksek sonuçlar ise metakaoline ile elde edilmiştir. %5 metakaolin katkılı köpük beton basınç dayanımı 1.135 MPa ve eğilme dayanımı ise 0.387 MPa'dır.

Farklı yoğunluk ve kürleme şartları köpük betonların dinamik elastisite modülü ve ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinin değişimine yol açmıştır. Köpük beton yoğunluk artışları; en yüksek yoğunluk için dinamik elastisite modülü ve ultrasonik ses geçiş hızlarında havada kürleme için sırasıyla % 183.52 ve % 30.31 ve otoklav kürlemesi için % 163.68 ve % 25.45 katlık artışlar söz konusudur. Uçucu kül ve ince geri dönüştürülmüş beton agregasının köpük betonda saf kum yerine farklı oranlar (% 25, 50, 75 ve 100) dikkate alınarak elde edilen köpük beton numunelerinin özelliklerinin değerlendirilmesinde; Kullanılan oranların artmasıyla, köpük betonun görünür gözenekliliğinin iyileşmesine, dolayısıyla su emiliminin artmasına ve köpük betonun basınç dayanımı, dinamik elastik modül, ultrasonik ses hızı ve ısı iletkenliğinin azalmasına yol açtığını işaret edilmiştir. (Gencel, vd. 2021) Mevcut çalışma bulgularıda, otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonların basınç dayanımları ile dinamik elastisite modülü ve ultrasonik ses geçiş hızları arasında yüksek belirleme katsayılarına (R^2) sahip ilişkiler olduğunu göstermektedir. Konuyla ilgili bu çalışmada köpük betonun dinamik elastik modülü, malzeme yoğunluğu ile bir korelasyona sahip olduğu değerlendirilmektedir. Dinamik elastik modülü ve artan yoğunluk oranı arasında artan lineer bir ilişkisi vardır. (Feng, vd. 2020)

Yalıtımda ısı iletkenliğinin en aza indirilmesi ve dayanımın en üst düzeyde tutulması arasındaki dengenin sağlanması bir zorunluluktur. Çalışma kapsamında ısı iletkenlik katsayılarının kürleme yöntemine bakılmaksızın köpük beton yoğunluk artışıyla artması söz konusudur. Konuyla ilgili diğer pek çok çalışma bulguları da aynı doğrultudadır (Baranova ve Ryabkov, 2019, Xi vd., 2021, Gołaszewski vd., 2022). Ek olarak otoklavlama, tüm köpük beton yoğunlukları için ısı iletkenliğini azaltmış ise de ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletkenlik katsayısı ($<0.065 \text{ W/mK}$) için istenilen şartı her iki kürleme yöntemi kapsamında sadece 300 kg/m^3 yoğunlukta otoklavlanmış köpük beton sağlamıştır. Ancak söz konusu yoğunlukta, çimento ile ikame edilen mineral katkı oranı artışları ısı iletkenliğinin artmasına yol açmış ve sadece uçucu külün tüm katkı oranları için ısı iletkenlik sınır değeri aşılmamıştır. Bazı mineral katkıların (volastonit ve diyopsit) otoklavlanmamış betonda en düşük yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri minimum katkı miktarlarına özgüdür ve mineral katkı türünün de etkisi söz konusudur (Mashkin vd., 2018).

SEM görüntülerine ilişkin ortalama gözenek boyutu verileri, yoğunluk değişimlerini ve otoklavlanmanın etkisini kısmen açıklar niteliktedir. Otoklavlama, portlandit kristallerinin önemli bir bölümünün tobarmorite (C-S-H) dönüşmesinde etkilidir. Söz konusu bulgu XRD verilerince de desteklenmektedir. Yapılan diğer bazı çalışmalarda da SEM görüntüleri ve XRD verilerinin nispeten niteliksel bir değerlendirme sağladığı gözlenmektedir (Abd Elrahman vd., 2021, Alnahhal vd., 2022).

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Otoklavlama işlemi, hidratasyon sürecini hızlandırması nedeniyle köpük betonda ciddi bir sorun olan kuruma büzülmesini minimize etmektedir. Kuruma büzülmesi havada kürlenmiş köpük betonda % 0.28 iken otoklavlanmış köpük betonda % 0.07'dir.
- Aynı yoğunluklardaki köpük betonlarda otoklavlanmanın etkisiyle kapiler su emme katsayısı değerleri havada kürlenmiş köpük betona göre azalmıştır. Bu durum otoklavlanmış köpük betonun havada kürlenmiş köpük betona göre bünyesinde daha az su tuttuğunu göstermektedir. Mineral katkıları bağlamında en düşük kapiler su emme katsayısı %5 uçucu küle sağlamıştır.
- Su buharı difüzyon direnç faktörü değerleri, kürlenme yöntemine bakılmaksızın köpük beton yoğunluk artışıyla artmış, ancak aynı köpük beton yoğunlukları için otoklavlanmanın etkisiyle azalmıştır.
- Otoklavlama, gerek farklı yoğunluklardaki köpük beton serileri ve gerekse aynı yoğunlukluktaki mineral katkılı köpük beton serilerinde basınç ve eğilme dayanımlarını artırmıştır.
- Dinamik elastisite modülü ve ultrasonik ses hızı için en yüksek değerler (0.624 GPa ve 1.40 km/s) basınç ve eğilme dayanımlarıyla uyumlu olarak yine %5 metakaolin katkılı köpük beton numunelerinde sağlanmıştır.
- Otoklavlanmış mineral katkılı köpük betonlar içerisinde istenilen standardı sağlayan en düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip numune, % 5 oranındaki uçucu kül içeren numunelerdir.
- Otoklavlanmış ve havada kürlenmiş köpük betonlarda birbirinden bağımsız kapalı gözenekler için SEM görüntülerinden belirlenen boyut farklılığı

yaklaşık 100 μm dolayındadır. Dolayısıyla fiziksel, mekanik veya termal özelliklerdeki değişimlerin yorumlanmasına yeterli katkıyı vermesi beklenmemelidir.



KAYNAKLAR

- Abd Elrahman, M., Sikora, P., Chung, S. Y., Stephan, D., 2021. The Performance of Ultra-Lightweight Foamed Concrete Incorporating Nanosilica. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 21(2), 1-16.
- Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., Siddique, S., 2021. A Comprehensive Review on the Performance of Structural Lightweight Aggregate Concrete for Sustainable Construction. Construction Materials, 1(1), 39-62.
- Ahmadi, S. F., Reisi, M., Amiri, M. C., 2022. Reusing Granite Waste in Eco-Friendly Foamed Concrete as Aggregate. Journal of Building Engineering, 46, 103566.
- Ai, L., 2016. Construction Method Of The New Thermal Insulation Material Foam Concrete. In 6th International Conference on Management, Education, Information and Control (Meic 2016), September 24-26, Shenyang, China, 408-412.
- Almudaiheem, J. A., Hansen, W., 1987. Effect of Specimen Size and Shape on Drying Shrinkage of Concrete. Materials Journal, 84(2), 130-135.
- Almusallam, A. A., 2001. Effect of Environmental Conditions on The Properties of Fresh and Hardened Concrete. Cement and Concrete Composites, 23(4-5), 353-361.
- Alnahhal, A. M., Alengaram, U. J., Yusoff, S., Darvish, P., Srinivas, K., Sumesh, M., 2022. Engineering Performance of Sustainable Geopolymer Foamed and Non-Foamed Concretes. Construction and Building Materials, 316, 125601.
- Alnkaa, A., Yaprak, H., Memiş, S., Kaplan, G., 2018. Effect of Different Cure Conditions on the Shrinkage of Geopolymer Mortar. Int. J. Eng. Res. Dev., 14(10), 51-55.
- Amran, M., Huei Lee, Y., Vatin, N., Fediuk, R., Poi-Ngian, S., Yong Lee, Y., Murali, G., 2020. Design Efficiency, Characteristics, and Utilization of Reinforced Foamed Concrete: A Review. Crystals, 10(10), 948.
- Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Khudhair, M. H. R., Hejazi, F., Alaskar, A., Alrshoudi, F., Siddika, A., 2020. Performance Properties of Structural Fibred-Foamed Concrete. Results in Engineering, 5, 100092.
- Amran, Y. M., Farzadnia, N., Ali, A. A., 2015. Properties and Applications of Foamed Concrete; A Review. Construction and Building Materials, 101, 990-1005.
- Anonim, 2021a. Çimsa Şirketi. Ankara/Türkiye. <https://www.cimsa.com.tr/tr/urunhizmetler/cimento/gri-cimento/cimsa-cem-i-42-5-r-portland-cimento/i-104> (erişim tarihi: 04 Kasım 2021).

- Anonim, 2021b. Polat Maden Şirketi. Aydın/Türkiye. https://www.polatmaden.com.tr/urun_detay.asp?kat=4&idx=26 (erişim tarihi: 04 Kasım 2021).
- Anonim, 2021c. Aydos Kimya Şirketi. Kocaeli/Türkiye. <http://www.aydos.com.tr/tr/urun-detay/aydos-lightcon-28> (erişim tarihi: 04 Kasım 2021).
- Anonymous, 2022. American Concrete Institute. Lightweight Concrete. <https://www.Concrete.Org/Topicsinconcrete/Topicdetail/Lightweight%20concrete?Search=Lightweight%20concrete>. Erişim Tarihi. 22.09.2022.
- Arslan, M. A., & Aktaş, M. 2018. İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi. Politeknik Dergisi, 21(2), 299-320.
- ASTM C597-16, 2016. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA 19428-2959 USA.
- ASTM D 5550-14, 2016. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA.
- Awang, H., Mydin, M. A. O., Roslan, A. F., 2012a. Effect of Additives on Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete. Advances in Applied Science Research, 3(5), 3326-3338.
- Awang, H., Mydin, M. A. O., Roslan, A. F., 2012b. Microstructural Investigation of Lightweight Foamed Concrete Incorporating Various Additives. International Journal of Academic Research, 4(2).
- Aytaç, Sertaç (2022,13,5).’’ Ertuğrul Şen ile Röportaj: 10 Soruda Türkiye’de Isı Yalıtımı’’[Görüntülü Görüşme]. Şantiye Dergisi 393. Sayısı, s.48-50. URL: <https://www.santiye.com.tr/edergi/393/#p=50>
- Baranova, A., Ryabkov, I., 2019. Investigation of Thermal Conductivity of Non-Autoclaved Foam Concrete Based on Microsilica. In Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, Investments, Construction, Real Estate: New Technologies and Special-Purpose Development Priorities, 25 Nisan 2019, Irkutsk, Rusya Federasyonu, 667(1), 012010.
- Bartenjeva, E., Mashkin, N., 2017. Technological Parameters Influence on the Non-Autoclaved Foam Concrete Characteristics. In Aip Conference Proceedings, 1800(1) 020012.
- Barutcu, N. 2021. Know-how sözleşmesi ve tarafların hak ve borçları. Ankara Üniversitesi,Sosyal bilimler Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi, 151s.,Ankara.
- Başpınar, M. S., Kurtuluş, C., 2018. Kompozisyon Değişiminin Geopolimer Köpük Beton Temel Özelliklerine Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri ve Uygulamalı Bilimler Dergisi, 1(1), 5-11.

- Bayraktar, O. Y., Yarar, G., Benli, A., Kaplan, G., Gencel, O., Sutcu, M., Kozlowski, M., Kadela, M., 2022. Basalt Fiber Reinforced Foam Concrete with Marble Waste and Calcium Aluminate Cement. *Structural Concrete*, 1-27.
- Ben Youssef, M., Miled, K., Néji, J., 2020. Mechanical Properties of Non-Autoclaved Foam Concrete: Analytical Models vs. Experimental Data. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 24(4), 472-480.
- Bindiganavile, V., Hoseini, M., 2019. Foamed Concrete. Mindess, S. (Ed.), In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete İçinde* (365-390). Woodhead Publishing, 308s.
- Brady, K. C., Watts, G. R. A., Jones, M. R., 2001. Specification For Foamed Concrete. *Pr/Is/40/01*, 78 S.
- Bremner, T. W., 2008. Lightweight Concrete. Mindess, S. (Ed.), In *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete İçinde* (307-323). Woodhead Publishing, 308s.
- Cengel, Y. A., Klein, S., & Beckman, W. 1998. Heat transfer: a practical approach (Vol. 141). Boston: WBC McGraw-Hill.
- Characterization of Ultra-Lightweight Foamed Concrete Incorporating Lightweight Aggregates. *Applied Sciences*, 9(7), 1447.
- Chen, B., Guan, B., Lu, X., Tian, B., Li, Y., 2022. Thermal Conductivity Evolution of Early-Age Concrete under Variable Curing Temperature: Effect Mechanism and Prediction Model. *Construction and Building Materials*, 319, 126078.
- Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637-647.
- Dao, D. V., Ly, H. B., Vu, H. L. T., Le, T. T., Pham, B. T., 2020. Investigation and Optimization of the C-Ann Structure in Predicting the Compressive Strength of Foamed Concrete. *Materials*, 13(5), 1072.
- Davraz, M. E. T. İ. N., & Gunduz, L. 2005. Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(7), 1251-1261.
- Davraz, M. ve Kılıncarslan, Ş., 2020. Usability of PC-ash as lightweight aggregate in foam concrete. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 161(161), 49-56.
- Davraz, M., Kılıncarslan, Ş., & Koru, M. 2015. Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal beton kongresi, 16-18.

- Davraz, M., Kili arslan,  ., Koru, M. Ve Tuzlak, F., 2016. Investigation of relationships between ultrasonic pulse velocity and thermal conductivity coefficient in foam concretes. *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 469-470.
- Dawood, E. T., Mohammad, Y. Z., Abbas, W. A., Mannan, M. A., 2018. Toughness, Elasticity and Physical Properties for the Evaluation of Foamed Concrete Reinforced with Hybrid Fibers. *Heliyon*, 4(12), E01103.
- Demchyna, B., Lysiuk, S., Famulyak, Y., 2019. Investigation of Non-Autoclaved Foam-Concrete Beams Reinforced with Bamboo. *Archives of Materials Science and Engineering*, 96(2).
- Demir,  ., Ba pınar, M. S., Kahraman, E., 2017. K p k Betonun Reolojik  zelliklerinin Deneysel Olarak  ncelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 38(1), 109-118.
- Dong, Y., Ma, Y., Zhu, J., Qiu, J., 2022. Study on Impermeability of Foamed Concrete Containing Municipal Solid Waste Incineration Powder. *Materials*, 15(15), 5176.
- Dylewski, R., & Adamczyk, J. (2016). The environmental impacts of thermal insulation of buildings including the categories of damage: A Polish case study. *Journal of Cleaner Production*, 137, 878-887.
- Elango, K. S., Sanfeer, J., Gopi, R., Shalini, A., Saravanakumar, R., Prabhu, L., 2021. Properties of Light Weight Concrete–A State of the Art Review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4059-4062.
- Elzokra, A., Al Hour, A., Habib, A., Habib, M., Malkawi, A. B., 2020. Shrinkage Behavior of Conventional and Nonconventional Concrete: A Review. *Civ Eng J*, 6(9), 1839-51.
- Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., Gugliandolo, E., 2018. Experimental Investigation on the Compressive Strength of Foamed Concrete: Effect of Curing Conditions, Cement Type, Foaming Agent and Dry Density. *Construction and Building Materials*, 165, 735-749.
- Falliano, D., Restuccia, L., Ferro, G. A., 2022. Increase the Fracture Energy of Foamed Concrete: Two Possible Solutions. *Procedia Structural Integrity*, 39, 229-235.
- Feng, L., Chen, X., Ning, Y., Wang, J., Zhang, W., 2022. High Temperature Effect of Foamed Concrete under Equal Displacement Increment Triaxial Cyclic Compression. *Construction and Building Materials*, 327, 126989.
- Feng, S., Zhou, Y., Wang, Y., & Lei, M. (2020). Experimental research on the dynamic mechanical properties and damage characteristics of lightweight foamed concrete under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 140, 103558.

- Gencil, O., Oguz, M., Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Recycling waste concretes as fine aggregate and fly ash as binder in production of thermal insulating foam concretes. *Journal of Building Engineering*, 38, 102232.
- Ghorbani, S., Sharifi, S., De Brito, J., Ghorbani, S., Jalayer, M. A., Tavakkolizadeh, M., 2019. Using Statistical Analysis and Laboratory Testing to Evaluate the Effect of Magnetized Water on the Stability of Foaming Agents and Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 207, 28-40.
- Gołaszewski, J., Klemczak, B., Smolana, A., Gołaszewska, M., Cygan, G., Mankel, C., Peralta, I., Röser, F., Koenders, E. A., 2022. Effect of Foaming Agent, Binder and Density on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Ultra-Light Foam Concrete. *Buildings*, 12(8), 1176.
- Gökçe, H. S., Hatungimana, D., Ramyar, K., 2019. Effect of Fly Ash and Silica Fume on Hardened Properties of Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 1-11.
- Guglielmi, P. O., Silva, W. R. L., Repette, W. L., Hotza, D., 2010. Porosity and Mechanical Strength of an Autoclaved Clayey Cellular Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2010.
- Hansen, T. C., Mattock, A. H., 1966. Influence of Size And Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete. In *Journal Proceedings*, 63(2), 267-290.
- He, J., Gao, Q., Song, X., Bu, X., He, J., 2019. Effect of Foaming Agent on Physical and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, 226, 280-287.
- Hilal, A. A., 2015. Properties and microstructure of pre-formed foamed concretes (Doctoral dissertation, University of Nottingham).
- Holt, E., Leivo, M., 2004. Cracking Risks Associated with Early Age Shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 521-530.
- Hou, L., Li, J., Lu, Z., Niu, Y., 2021. Influence of Foaming Agent on Cement and Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 280, 122399.
- Houst, Y. F., 1997. Carbonation Shrinkage of Hydrated Cement Paste. In *Proc. 4th Canmet/Aci International Conference on Durability of Concrete*, Ottawa, Canada, 481-491
- Hu, C., Li, H., Liu, Z., Wang, Q., 2016. Influence of Curing Conditions on the Compressive Strength of Foamed Concrete. *International Conference on Power Engineering and Energy, Environment*, November 21-23, Sanya, China,
- Hung Anh, L.D. and Pásztor, Z. 2021. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering*, 44, 102604.

- Ilić, B. R., Mitrović, A. A., & Miličić, L. R. (2010). Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijska industrija*, 64(4), 351-356.
- Jalal, M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K., Ahmed, F., 2017. Foam Concrete. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(1), 1-14.
- Jhatial, A. A., Goh, W. I., Mastoi, A. K., Traore, A. F., Oad, M., 2022. Environmental Assessment and Mechanical Properties of Polypropylene Fibres Reinforced Ternary Binder Foamed Concrete. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(2), 2985-3007.
- Jones, M. R., & McCarthy, A. 2006. Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and concrete research*, 36(6), 1032-1041.
- Kang, C., Kang, G. W., Kang, E. G., Noh, J. M., Kwon, G. J., Kim, J. M., 2005. Strength Variations of Light Weight Foamed Concrete According to the Autoclaving Time. In *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, 57-60.
- Kavitha, D., Mallikarjunrao, K. V. N., 2018. Design and Analysis of Foam Concrete. *Int. J. Eng. Trends Appl*, 5, 113-128.
- Kearsley, E. P., Wainwright, P. J., 2001. Porosity and Permeability of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(5), 805-812.
- Khan, M., Shakeel, M., Khan, K., Akbar, S., Khan, A., 2022. A Review on Fiber-Reinforced Foam Concrete. *Engineering Proceedings*, 22(1), 13.
- Kılıncarslan, Ş., Davraz, M., & Işıldar, N., 2019. Genleştirilmiş Polistrenin Uçucu Kül İçeren Köpük Beton Özellikleri Üzerine Etkileri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 224-231.
- Kılınçarslan, Ş., Davraz, M., Kuru, M. ve Ekiztaş, F., 2017. Investigation of properties of foam concretes produced using pumice at different ratios. *Acta Physica Polonica A*, 132(3), 708-709.
- Kilincarslan, Ş., Davraz, M. ve Akça, M., 2018. The effect of pumice as aggregate on the mechanical and thermal properties of foam concrete. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11), 1-6.
- Kim, D. V., Cong, L. N., Van, L. T., Bazhenova, S. I., 2019. Foamed Concrete Containing Various Amounts of Organic-Mineral Additives. In *Journal of Physics: Conference Series* 1425(1), 012199.
- Kim, H. S., Lee, S. H., Kim, B., 2017. Properties of Extrusion Concrete Panel Using Waste Concrete Powder. *Applied Sciences*, 7(9), 910.

- Kim, J. M., Jeong, J. Y., 2012. Influence of Foaming Agents on the Properties of Foamed Concretes Having Various Densities. *한국건축시공학회지*, 121, 22-30.
- Kocaoğlu Güçlü, B., Uyanık, F., 2004. Saponinler ve Biyolojik Önemi. *Erciyes Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 1(2), 125-131.
- Kou, R., Guo, M. Z., Shi, Y., Mei, M., Jiang, L., Chu, H., Zhang, Y., Shen, H., Xue, L., 2022. Sound-Insulation and Photocatalytic Foamed Concrete Prepared with Dredged Sediment. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131902.
- Kovler, K., Zhutovsky, S., 2006. Overview and Future Trends of Shrinkage Research. *Materials and Structures*, 39(9), 827-847.
- Kozłowski, M., Kadela, M., 2018. Mechanical Characterization of Lightweight Foamed Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.
- Lemmet, S., 2009. Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers. *UNEP SBCI*.
- Li, Z., Yuan, H., Gao, F., Zhang, H., Ge, Z., Wang, K., Sun, R., Guan, Y., Ling, Y., Jiang, N., 2021. A Feasibility Study of Low Cement Content Foamed Concrete Using High Volume of Waste Lime Mud and Fly Ash for Road Embankment. *Materials*, 15(1), 86.
- Liu, J., Ren, Y., Chen, R., Wu, Y., Lei, W., 2022. The Effect of Pore Structure on Impact Behavior of Concrete Hollow Brick, Autoclaved Aerated Concrete and Foamed Concrete. *Materials*, 15(12), 4075.
- Liu, J., Yu, C., Shu, X., Ran, Q., Yang, Y., 2019. Recent Advance of Chemical Admixtures in Concrete. *Cement and Concrete Research*, 124, 105834.
- Lura, P., Van Breugel, K., Maruyama, I., 2001. Effect of Curing Temperature and Type of Cement on Early-Age Shrinkage of High-Performance Concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(12), 1867-1872.
- Ma, K., Ren, F., Huang, H., Yang, X., Zhang, F., 2022. Experimental Investigation on the Dynamic Mechanical Properties and Energy Absorption Mechanism of Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 342, 127927.
- Mansyur, M., Tjaronge, M. W., Irmawaty, R., Arwin Amiruddin, A., 2022. Performance of Prefabricated Foam Concrete as Infilled Wall under Cyclic Lateral Loading. *International Journal of Engineering*, 35(2), 337-343.
- Mao, Y., Liu, J., Shi, C., 2021. Autogenous Shrinkage and Drying Shrinkage of Recycled Aggregate Concrete: a Review. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126435.

- Mashkin, N., Bartenjeva, E., 2018. Research of Structuring Processes of Non-Autoclave Foam Concrete with Introduction of Mineral Additives. In Iop Conference Series: Materials Science and Engineering 451(1), 012018.
- Mashkin, N., Bartenjeva, E., Mansurov, R., 2018. Naturally Cured Foamed Concrete with Improved Thermal Insulation Properties. In Matec Web of Conferences, 143, 02005.
- Maslehuddin, M., Ibrahim, M., Shameem, M., Ali, M. R., Al-Mehthel, M. H., 2013. Effect of Curing Methods on Shrinkage and Corrosion Resistance of Concrete. Construction and Building Materials, 41, 634-641.
- Mateos, A., Harvey, J., Bolander, J., Wu, R., Paniagua, J., Paniagua, F., 2019. Field Evaluation of the Impact of Environmental Conditions on Concrete Moisture-Related Shrinkage and Coefficient of Thermal Expansion. Construction and Building Materials, 225, 348-357.
- Matos, P. R., Neto, J. S. A., Jansen, D., Angeles, G., Kirchheim, A. P., & Campos, C. E. 2022. In-situ laboratory X-ray diffraction applied to assess cement hydration. Cement and Concrete Research, 162, 106988.
- Mattila, H. 2017, Moisture Behavior of Building Insulation Materials and Good Building Practices, Conference: Rakennusfysiikka 2017, October 24-26 2017, Tampere University, 1-8.
- Mercan, H. 2016. Yalıtım sektöründe pazar araştırması ve pazarlama stratejilerinin incelenmesi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 133s., Eskişehir.
- Mestnikov, A., Semenov, S., Strokova, V., Nelubova, V., 2016. Autoclave Foam Concrete: Structure and Properties. In Aip Conference Proceedings, 1698(1), 070010.
- Mohammed, J. H., Hamad, A. J., 2014. Materials, Properties and Application Review of Lightweight Concrete. Technical Review of the Faculty of Engineering University of Zulia, 37(2), 10-15.
- Mydin, M. A. O., Wang, Y. C., 2012. Mechanical Properties of Foamed Concrete Exposed to High Temperatures. Construction and Building Materials, 261, 638-654.
- Nadh, V. S., Muthumani, K., 2017. Critical Review on Structural Light Weight Concrete. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(2), 111-127.
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K., 2007. Air- Void Characterisation of Foam Concrete. Cement and Concrete Research, 37(2), 221-230.
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K., 2009. Shrinkage Behavior of Foam Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 21(11), 631-636.

- Namsone, E., Šahmenko, G., Korjamins, A., 2017. Durability Properties of High Performance Foamed Concrete. *Procedia Engineering*, 172, 760-767.
- Nematzadeh, A., Aytakin, B., Mardani-Aghabaglou, A., 2021. Effect of Mineral Additives and Permeability Reducing Admixtures Having Different Action Mechanisms on Mechanical and Durability Performance of Cementitious Systems. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 15(5), 1277-1291.
- Neville, A. M. 1995. *Properties of Concrete* (Vol. 4). London: Longman.
- Neville, A. M. 2011 *Properties of Concrete Fifth Edition*. England.
- Newman, J., Owens, P., 2003. Special concretes. *Properties of Lightweight Concrete*. In Newman, J. and Choo, B.S. (Eds), *Advanced Concrete Technology* (2/3-29), Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Othman, R., Jaya, R. P., Muthusamy, K., Sulaiman, M., Duraisamy, Y., Abdullah, M. M. A. B., Przybyl, A., Sochacki, W., Skrzypczak, T., Vizureanu, P., Sandu, A. V., 2021. Relation Between Density and Compressive Strength of Foamed Concrete. *Materials*, 14(11), 2967.
- Panesar, D. K., 2013. Cellular Concrete Properties and the Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents. *Construction and Building Materials*, 44, 575-584.
- Peng, Y., Yuan, X., Jiang, L., Yang, J., Liu, Z., Zhao, Y., Chen, H., 2022. The Fabricating Methods, Properties and Engineering Applications of Foamed Concrete with Polyurethane: a Review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-20.
- Piasta, W., Zarzycki, B., 2017. The Effect of Cement Paste Volume and W/C Ratio on Shrinkage Strain, Water Absorption and Compressive Strength of High Performance Concrete. *Construction and Building Materials*, 140, 395-402.
- Postacıoğlu, B. 1975. *Yapı malzemesi problemleri*. Çağlayan Kitabevi.
- Posternak, I., Posternak, S., 2019. Cstc T-Ppr: Using Construction–Heat-Insulating an Autoclave Foam-Concrete. *Paradigm of Knowledge*, 1(33).
- Raj, A., Sathyan, D., Mini, K. M., 2019. Physical and Functional Characteristics of Foam Concrete: a Review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799.
- Raj, B., Sathyan, D., Madhavan, M. K., Raj, A., 2020. Mechanical and Durability Properties of Hybrid Fiber Reinforced Foam Concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118373.
- Risdanareni, P., Hilmi, A., Susanto, P. B., 2017. The Effect of Foaming Agent Doses on Lightweight Geopolymer Concrete Metakaolin Based. In *Aip Conference Proceedings*, 1835(1), 020057.

- Šahinagić-Isović, M., Markovski, G., Čećez, M., 2012. Shrinkage Strain of Concrete- Causes and Types. *Građevinar*, 64(9), 727-734.
- Sahu, S. S., Gandhi, I. S. R., Khwairakpam, S., 2018. State-of-the-Art Review on the Characteristics of Surfactants and Foam from Foam Concrete Perspective. *Journal of the Institution of Engineers India: Series A*, 992, 391-405.
- Serudin, A. M., Ganesan, S., Mydin, M. A. O., 2019. Potential of Lightweight Foamed Concrete in Construction. *Analele Universitatii'eftimie Murgu'*, 26(1).
- Shang, X., Qu, N., Li, J., 2022. Development And Functional Characteristics Of Novel Foam Concrete. *Construction And Building Materials*, 324, 126666.
- Shen, D., Wang, X., Cheng, D., Zhang, J., Jiang, G., 2016. Effect of Internal Curing with Super Absorbent Polymers on Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Age. *Construction and Building Materials*, 106, 512-522.
- Shi, J., Liu, B., He, Z., Liu, Y., Jiang, J., Xiong, T., Shi, J., 2021. A Feasibility Study. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125085.
- Shin, S. C., Choi, J. H., Hong, S. R., Kim, J. H., Jeong, J. Y., Kim, J. M., 2011. Properties of Light Weight Foamed Concrete According to Curing Condition. In *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*, 237-239.
- Siram, K. K. B., 2013. Foam Concrete-the Present Generation's Building Solution. *International Journal of Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering Research and Development (Ijcsierd)*, 3(4), 59-62.
- Siva, M., Ramamurthy, K., Dhamodharan, R., 2017. Development of a Green Foaming Agent and Its Performance Evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 80, 245-257.
- Strauba, C., Floreab, M. V. A., Querciaa, G., Brouwersb, H. J. H., 2019. Influence of the Water-and Foaming Agent Dosage on Hardened Autoclaved Aerated Concrete. *Proceedings Icsbm*, 3(234).
- Sun, C., Zhu, Y., Guo, J., Zhang, Y., Sun, G., 2018. Effects of Foaming Agent Type on the Workability, Drying Shrinkage, Frost Resistance and Pore Distribution of Foamed Concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 833-839.
- Sun, M., Visintin, P., Bennett, T., 2022. The Effect of Specimen Size on Autogenous and Total Shrinkage of Ultra-High Performance Concrete (Uhpc). *Construction and Building Materials*, 327, 126952.
- Tan, X., Han, F., Zhao, F. 2018. Preparation of Autoclaved Foamed Concrete Block from Fly Ash and Carbide Slag. In *Matec Web of Conferences*, 142, 02006).

- Tang, S., Huang, D., He, Z., 2021. A Review of Autogenous Shrinkage Models of Concrete. Journal of Building Engineering, 44, 103412.
- Taylor, H.F.W., 1997. Cement Chemistry. Academic Press, London.
- Tazawa, E. I. (Ed.), 1999. Autogenous Shrinkage of Concrete. CRC Press, 424p, London.
- Thienel, K. C., Haller, T., Beuntner, N., 2020. Lightweight Concrete—From Basics to Innovations. Materials, 13(5), 1120.
- Tian, W., Li, L., Zhao, X., Zhou, M., Wang, N., 2009. Application of Foamed Concrete in Road Engineering. International Conference on Transportation Engineering, 2009, 2114-2120.
- TS EN 1015-10/A1 2013. Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 1015-11 2020. Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 1015-18, 2004. Kâgir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kapiler etkiden kaynaklanan su emme katsayısının tayini, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 12086 2013. Isı yalıtım malzemeleri - Isı yalıtım malzemeleri - Binalar için - Su buharı geçirgenlik özelliklerinin tayini, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 12664 2009. Yapı malzemeleri ve mamulleri - Isıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerin kullanıldığı metotlarla tayini - Isıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller,TSE, Ankara.
- TS EN 12667 2003. Yapı malzemeleri ve mamullerinin ısıl performansı-Mahfazalı sıcak plaka ve ısı akış sayacı metotlarıyla ısıl direncin tayini-Yüksek ve orta ısıl dirençli mamuller, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 196-6, 2020. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 450-1, 2013. Uçucu Kül- Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN 680, 2006. Gaz beton - Kuruma büzülmesi tayini, TSE, I. Baskı, Ankara.
- TS EN ISO 12572, 2016. Binalarda kullanılan malzemelerin ve mamullerin ısı ve rutubet ilişkisine ait performansı - Su buharı iletim özelliklerinin tayini - Kap yöntemi, TSE, Ankara.
- Türkel, S., 2007. Özel Betonlar, Hafif Beton. İMO İzmir Şubesi Bülteni, 135.

- Van Deijk, S., 1919. Foam Concrete. *Concrete*, 25(5) 49-54.
- Vesova, L. M., 2016. Disperse Reinforcing Role in Producing Non-Autoclaved Cellular Foam Concrete. *Procedia Engineering*, 150, 1587-1590.
- Vu, K. D., Bazhenova, S. I., Nguyen, T. C., Tang, V. L., Do, M. C., Le, V. L., Hoang, M. T., 2022. Insulation Properties and Performance of Foam Concrete Using Blast Furnace Slag Karakteristike Izolacije I Performanse Peno-Betona Sa Primenom Šljake Iz Visoke Peći. *Structural Integrity and Life*, 22(1), 48-56.
- Wang, R., Gao, P., Tian, M., Dai, Y., 2019. Experimental Study on Mechanical and Waterproof Performance of Lightweight Foamed Concrete Mixed with Crumb Rubber. *Construction and Building Materials*, 209, 655-664.
- Wang, Y., Zhang, S., Wang, D., & Liu, Y. (2022). Experimental study on the influence of temperature and humidity on the thermal conductivity of building insulation materials. *Energy and Built Environment*.
- Wetzel, A., Umbach, C., Fehling, E., Middendorf, B., 2016. Multifunctional Prefabricated Walls Made of UHPC and Foam Concrete. *Insights Innov. Struct. Eng. Mech. Comput*, 86, 143-148.
- Xi, H., Yao, Y., Sun, Y., Mobasher, B., Liu, Y., Ma, H., 2021. Compressive and Thermal Properties of Foamed Concrete at High Temperature. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 1-25.
- Yaman, Ö., Şengül, Ö., Selçuk, H., Çalikuş, O., Kara, I., Erdem, Ş., Özgür, D., 2015. Binalarda Isı Yalıtımı ve Isı Yalıtım Malzemeleri, IMO Yapı Malzemeleri Komisyonu, 487, 62–75
- Yatağan, S. 2010. Beton ve Harçlarda Agrega Dane Boyutunun Rötire ve Durabiliteye Etkisi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 150s., İstanbul.
- Yuan, H., Ge, Z., Sun, R., Xu, X., Lu, Y., Ling, Y., Zhang, H. 2022. Drying Shrinkage, Durability and Microstructure of Foamed Concrete Containing High Volume Lime Mud-Fly Ash. *Construction and Building Materials*, 327, 126990.