



**UÇUCU KÜL KATKILI KÖPÜK BETON
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
TAŞIYICI OLMAYAN DUVAR PANELLERİ
ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Erhan KAHRAMAN

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2024

Bu tez çalışması 20.FEN.BİL.33 numaralı proje ile Afyon Kocatepe Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

**UÇUCU KÜL KATKILI KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE TAŞIYICI OLMAYAN DUVAR PANELLERİ
ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Erhan KAHRAMAN

Danışman

Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ağustos 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Erhan KAHRAMAN tarafından hazırlanan “Uçucu Kül Katkılı Köpük Beton Özelliklerinin İncelenmesi ve Taşıyıcı Olmayan Duvar Panelleri Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 29 / 08 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi **Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İsmail DEMİR

Başkan : Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi

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

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

Üye : Prof. Dr. Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

29 / 08 / 2024

İmza

Erhan KAHRAMAN

ÖZET

Doktora Tezi

UÇUCU KÜL KATKILI KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ VE TAŞIYICI OLMAYAN DUVAR PANELLERİ ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Erhan KAHRAMAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. İsmail DEMİR

Köpük betonlar yapı inşasında gün geçtikçe artan bir paya sahip olmaktadır. Köpük betonların uygulanabilirliğindeki pratiklik ve düşük birim ağırlığa sahip olmaları tercih edilmelerindeki en önemli etkenlerdendir. Atık bir malzeme olan uçucu külün köpük beton üretimlerinde değerlendirilmesi ile daha ekonomik ve çevre dostu ürünler elde edilebilmektedir. Bu tez çalışmasında ülkemizdeki termik santrallerden atık olarak elde edilen ve milyonlarca tona ulaşan miktarıyla depolanmasında da sorun teşkil eden uçucu kül katkılı köpük betonların özellikleri incelenmiştir. Ayrıca bu köpük betonların taşıyıcı olmayan duvar panelleri üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Araştırma kapsamında köpük beton üretimi için 8 farklı karışım oluşturulmuş ve bu karışımlardan elde edilen köpük betonların taze özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada 800 ve 1000 kg/m³ yoğunluğa sahip köpük beton numuneleri üretilmiştir. Köpük beton numunelerine öncelikle 8 saat boyunca buhar kürü ve sonrasında 7, 28 ve 90 günlük standart kür uygulanmıştır. Kür süresi dolan numunelere fiziksel, mekanik, fonksiyonel ve durabilite testleri yapılmıştır. Ayrıca köpük beton numunelerinin makro ve mikro yapı özellikleri de incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda uçucu kül katkılı köpük betonların mekanik, fiziksel, fonksiyonel ve durabilite özelliklerinin olumlu yönde geliştiği belirlenmiştir.

2024, xv + 115

Anahtar Kelimeler: Köpük Beton, Uçucu Kül, Taşıyıcı Olmayan Duvar Paneli

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EXAMINATION OF THE PROPERTIES OF FLYASH-ADDED FOAM CONCRETE AND INVESTIGATION OF ITS USABILITY IN THE PRODUCTION OF NON- BEARING WALL PANELS

Erhan KAHRAMAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. İsmail DEMİR

Foam concretes have an increasing share in building construction day by day. The practicality of the application of foam concretes, and their low unit weight are the most important factors influencing their preference. More economical and environmentally friendly products can be obtained by utilizing fly ash, which is a waste material, in foam concrete production. In this thesis, the properties of foam concrete with fly ash admixture, which is obtained as waste from thermal power plants in our country and poses a problem in its storage, with its amount reaching millions of tonnes, were investigated. In addition, the usability of these foam concretes in the production of non-bearing wall panels was investigated. Within the scope of the research, 8 different mixtures were formed for foam concrete production, and the fresh properties of foam concrete obtained from these mixtures were determined. Foam concrete specimens with 800 and 1000 kg/m³ density were produced in the study. Foam concrete specimens were firstly steam cured for 8 hours, and then standard curing was applied for 7, 28, and 90 days. Physical, mechanical, functional, and durability tests were performed on the cured specimens. Macro and microstructural properties of foam concrete specimens were also investigated. As a result of the experiments, it was determined that the mechanical, physical, functional, and durability properties of the foam concretes with fly ash admixture improved positively.

2024, xv + 115 pages

Keywords: Foam Concerete, Fly Ash, Non-Bearing Wall Panel.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasını 20.FEN.BİL.33 numaralı proje ile destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi'ne çok teşekkür ederim.

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR, çalışmalarım süresince yardımlarını, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. M. Serhat BAŞPINAR ve Sayın Doç. Dr. Ahmet Raif BOĞA hocalarıma,

Numune üretimlerim esnasında yardımlarını esirgemeyen İnş. Müh. İnancan Mertay MENTEŞELİ, Tekniker Bülent YEŞİLAY ve Teknisyen Ayşe GÜNGÖR'e,

Tez aşamasında tecrübelerinden istifade ettiğim Dr. Öğr. Üyesi Cansu KURTULUŞ hocama,

Bu süreçte her türlü destek ve anlayışları için canım eşime, çocuklarıma ve aileme en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Erhan KAHRAMAN
Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Önemi	2
1.2 Araştırma Kapsamı	2
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Köpük Beton	3
2.2 Köpük Betonun Tarihçesi	5
2.3 Üretim Yöntemleri ve Karışım Oranları	6
2.4 Köpük Betonun Avantajları	8
2.5 Köpük Betonun Dezavantajları.....	9
2.6 Köpük Betonun Kullanım Alanları.....	10
2.7 Köpük Betonun Sınıflandırılması	10
2.8 Köpük Beton Özellikleri.....	12
2.9 Taze Beton Özellikleri	12
2.9.1 Taze Birim Ağırlık	13
2.9.2 Marsh Konisi ve Yayılma Tablası	13
2.9.3 Kararlılık	13
2.10 Sertleşmiş Beton Özellikleri	14
2.10.1 Fiziksel Özellikler	14
2.10.1.1 Birim Ağırlık	14
2.10.1.2 Rölatif Uzunluk Değişimi	15
2.10.1.3 Su Emme	16
2.10.1.4 Ultrases Geçiş Hızı.....	16

2.10.1.5 Kılcal Su Emme.....	16
2.10.2 Mekanik Özellikler.....	17
2.10.2.1 Basınç Dayanımı	17
2.10.2.2 Eğilmede Çekme Dayanımı.....	17
2.10.3 Fonksiyonel Özellikleri	18
2.10.3.1 Isıl İletkenlik.....	18
2.10.3.2 Akustik Özellik.....	18
2.10.4 Durabilite Özellikleri.....	18
2.10.4.1 Donma Çözülme.....	18
2.11 Gözenek Oranı ve Gözenek Yapısı.....	19
2.12 Uçucu Kül.....	19
2.13 Polipropilen Lif.....	21
2.14 Alçı.....	21
2.15 Köpük Ajanı.....	21
2.16 Süper Akışkanlaştırıcı.....	22
2.17 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	22
3. MATERYAL VE METOT.....	26
3.1 Hammaddeler.....	26
3.1.1 Çimento	26
3.1.2 Köpük.....	27
3.1.3 Uçucu Kül	27
3.1.4 Su	28
3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı	28
3.1.6 Polipropilen Lif	29
3.1.7 Alçı.....	30
3.2 Deney Örneklerinin Hazırlanması	30
3.2.1 Üretim Aşaması.....	31
3.3 Test ve Analizler	36
3.3.1 Taze Beton Özellikleri	36
3.3.1.1 Taze Birim Ağırlık Deneyi	36
3.3.1.2 Kıvam Analizi	37
3.3.1.3 Yayılma Tablası Deneyi.....	37

3.3.2 Fiziksel Özellikler	38
3.3.2.1 Kuru Birim Ağırlık	38
3.3.2.2 Rölatif Uzunluk Değişimi	39
3.3.2.3 Su Emme Oranının Belirlenmesi	41
3.3.2.4 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi	42
3.3.2.5 Kılcal Su Emme Deneyi	43
3.3.3 Mekanik Özellikler	44
3.3.3.1 Basınç Dayanımı Deneyi	44
3.3.3.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	45
3.3.4 Fonksiyonel Özellikleri	47
3.3.4.1 Zamana Bağlı Yüzey Sıcaklığı Geçiş Simülasyon Deneyi	47
3.3.4.2 Akustik Özellik Simülasyon Deneyi	48
3.3.5 Durabilite Özellikleri	50
3.3.5.1 Donma Çözülme Deneyi	50
3.3.6 Makro Özellikler	51
3.3.6.1 Gözenek Boyut Analizleri	51
3.3.7 Mikro Özellikler	52
3.3.7.1 Taramalı Elektron Mikroskobu	52
3.3.7.2 XRD Analizi	52
4. BULGULAR	53
4.1 Taze Köpük Beton Deneyleri	53
4.1.1 Akış Süresi ve Yayılma Deneyleri	53
4.1.2 Taze Birim Ağırlık	55
4.2 Sertleşmiş Köpük Beton Deneyleri	57
4.2.1 Fiziksel Özellik Testleri	57
4.2.1.1 Kuru Birim Ağırlık Sonuçları	57
4.2.1.2 Rölatif Uzunluk Değişimi Sonuçları	59
4.2.1.3 Su Emme Deneyi Sonuçları	64
4.2.1.4 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	67
4.2.1.5 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları	70
4.2.2 Mekanik Özellik Testleri	72
4.2.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları	72

4.2.2.2 Basınç Dayanımı- Birim Ağırlık İlişkisi	75
4.2.2.3 Basınç Dayanımı- Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi	77
4.2.2.4 Eğilme Dayanımı Sonuçları	78
4.3 Fonksiyonel Özellikler Testleri	81
4.3.1 Zamana Bağlı Yüzey Sıcaklığı Geçiş Simülasyon Sonuçları	81
4.3.2 Akustik Özellik Simülasyon Sonuçları	83
4.4 Durabilite Testi	85
4.4.1 Donma Çözülme Dayanımı Sonuçları	85
4.5 Makroyapı Özellikleri.....	89
4.5.1 Polarizan Mikroskop ile Gözenek Boyutları Ölçümü.....	89
4.6 Mikroyapı Özellikleri	92
4.6.1 Taramalı Elektron Mikroskobu	92
4.6.2 XRD Analizi	96
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	99
6. KAYNAKLAR.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

H ₂ O	Hidrojen monoksit (Su)
SiO ₂	Silisyum dioksit
Fe ₂ O ₃	Demir oksit
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
MgO	Magnezyum oksit
Na ₂ O	Sodyum oksit
P ₂ O ₅	Fosfor pentoksit
K ₂ O	Potasyum oksit
TiO ₂	Titanyum dioksit
MnO	Manganez oksit
SO ₃	Kükürt trioksit
NiO	Nikel oksit
Cr ₂ O ₃	Kromyum oksit
H ₂ O ₂	Hidrojen peroksit
A.Z. (LOI)	Kızdırma kaybı
CaSO ₄	Kalsiyum sülfat
kg	Kilogram
g	Gram
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
m ³	Metreküp
Fe	Demir
s	Saniye
L	Litre
W	Watt
m	Metre
%	Yüzde
dk	Dakika
kgf	Kilogramkuvvet
A ₀	Yüzey alanı
Dh	Birim hacim ağırlık
Mk	Etüv kuru ağırlık
Vh	Numunenin boşluklar dahil hacmi
µ _{mi}	Nem içeriği
m _i	Deney numunesinin i ölçüm tarihindeki yaş kütlesi
md	Deney numunesinin kurutulduktan sonraki kütlesi
m _{pim}	Ölçü pimlerinin kütlesi
Sa	Ağırlıkça yüzde su emme
P ₁	Etüv kuru ağırlık
P ₂	Suya doymuş yüzey kuru ağırlık
V	Ultrases geçiş hızı
M	Problar arası mesafe
T	Zaman (süre)

f_b	Basınç dayanımı
P_k	Kırılma anındaki yük
Σ	Eğilme dayanımı
P	Kırılma yükü
L	Mesnetler arası mesafe
B	Numunenin genişliği
h	Numunenin yüksekliği

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
BHA	Birim Hacim Ağırlık
EN	Avrupa Standartları Komitesi
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
Max.	Maksimum
Min.	Minimum
MPa	Megapaskal
MT	Mermer Tozu
S/B	Su/Bağlayıcı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopu
TS EN	Türk Standardı Avrupa Normları
TUAM	Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
UK	Uçucu Kül
XRD	X Işınları Difraktometrisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Gözenekli beton ve köpük beton üretim yöntemleri	7
Şekil 2.2.	Köpük beton karıştırma ve üretim sürecine ilişkin örnek (ACI 523.3r-14). ..	8
Şekil 2.3	Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması.....	11
Şekil 4.1	Yayılma akış süresi değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	54
Şekil 4.2	Yayılma akış süresi değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	55
Şekil 4.3	Taze birim ağırlık ve kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	56
Şekil 4.4	Taze birim ağırlık ve kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	57
Şekil 4.5	Kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	58
Şekil 4.6	Kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	59
Şekil 4.7	800UK0 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	60
Şekil 4.8	800UK5 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	60
Şekil 4.9	800UK10 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	61
Şekil 4.10	800UK15 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	61
Şekil 4.11	1000UK0 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	62
Şekil 4.12	1000UK5 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	62
Şekil 4.13	1000UK10 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	63

Şekil 4.14 1000UK15 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.....	63
Şekil 4.15 Su emme değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³)..	66
Şekil 4.16 Su emme değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	66
Şekil 4.17 Ultrases geçiş hızı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	68
Şekil 4.18 Ultrases geçiş hızı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	69
Şekil 4.19 Kılcallık katsayısı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	71
Şekil 4.20 Kılcallık katsayısı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	71
Şekil 4.21 Basınç dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	74
Şekil 4.22 Basınç dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	75
Şekil 4.23 Basınç dayanımı- birim ağırlık sonuçları arasındaki ilişki (800 kg/m ³).....	76
Şekil 4.24 Basınç dayanımı- birim ağırlık sonuçları arasındaki ilişki (1000 kg/m ³).....	76
Şekil 4.25 Basınç dayanımı- ultrases geçiş hızı sonuçları arasındaki ilişki (800 kg/m ³).	77
Şekil 4.26 Basınç dayanımı- ultrases geçiş hızı sonuçları arasındaki ilişki (1000 kg/m ³).	77
Şekil 4.27 Eğilme dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m ³).	79
Şekil 4.28 Eğilme dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m ³).	79
Şekil 4.29 Donatılı duvar panelleri için eğilme dayanımlarının uçucu kül oranına göre değişimi.	81
Şekil 4.30 Yüzey sıcaklığı artışının uçucu kül oranına göre değişimi.....	83
Şekil 4.31 Ses yutma değerinin uçucu kül oranına göre değişimi.	84
Şekil 4.32 Ağırlık kaybının uçucu kül oranına göre değişimi.	87
Şekil 4.33 Ultrases geçiş hızının uçucu kül oranına göre değişimi.	88

Şekil 4.34 Basınç dayanımı kaybının uçucu kül oranına göre değişimi.	89
Şekil 4.35 800 kg/m ³ birim ağırlığa ait gözenek çapı incelemeleri, a)800UK0, b) 800UK5, c) 800UK10, d) 800UK15.	90
Şekil 4.36 1000 kg/m ³ birim ağırlığa ait gözenek çapı incelemeleri a)1000UK0, b)1000UK5, c)1000UK10, d)1000UK15.	91
Şekil 4.37 800 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.....	93
Şekil 4.38 800 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %15 uçucu kül katkılı seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 1000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.....	94
Şekil 4.39 1000 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.....	95
Şekil 4.40 1000 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %15 uçucu kül katkılı seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.....	96
Şekil 4.41 800 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı ve %15 uçucu kül katkılı serilerin XRD analizleri.....	97
Şekil 4.42 1000 kg/m ³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı ve %15 uçucu kül katkılı serilerin XRD analizleri.....	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Hafif betonların sınıflandırılması	12
Çizelge 3.1 CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri. ..	26
Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal yapısı.	28
Çizelge 3.3 Sika Viscocrete 5556 Hi-Tech teknik özellikler.	29
Çizelge 3.4 Köpük beton karışım oranları.	31
Çizelge 4.1 Köpük beton harç yayılma ve akış süresi değerleri.	54
Çizelge 4.2 Köpük beton numunelerin birim ağırlık değerleri.	56
Çizelge 4.3 Köpük beton numunelerin kuru birim ağırlık değerleri.	58
Çizelge 4.4 Köpük beton numunelerin rölatif uzunluk değişim değerleri.	59
Çizelge 4.5 Köpük beton numunelerin su emme değerleri.	65
Çizelge 4.6 Köpük beton numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri.	67
Çizelge 4.7 Köpük beton numunelerin kılcallık katsayısı değerleri.	70
Çizelge 4.8 Köpük beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.	73
Çizelge 4.9 Köpük beton numunelerin eğilme dayanımı değerleri.	78
Çizelge 4.10 Donatılı üretilen duvar paneli numunelerin eğilme dayanımı değerleri. ..	80
Çizelge 4.11 Köpük beton plaka numunelerin yüzey sıcaklık artış değerleri.	82
Çizelge 4.12 Köpük beton numunelerin ses yutma değerleri.	84
Çizelge 4.13 Köpük beton numunelerin donma çözülme öncesi ve sonrası ağırlık kaybı değerleri.	85
Çizelge 4.14 Köpük beton numunelerin ultrases geçiş hızı donma çözülme öncesi ve sonrası değerleri.	86
Çizelge 4.15 Köpük beton numunelerin basınç dayanımı donma çözülme öncesi ve sonrası değerleri.	87

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Seyitömer uçucu külü.	27
Resim 3.2 Polipropilen Lif.....	29
Resim 3.3 Hazırlanan harçtan mikserde homojen karışımın elde edilmesi.	31
Resim 3.4 Karışıma ilave edilecek köpüğün üretimi.	32
Resim 3.5 Karışıma ilave edilecek köpüğün birim ağırlık ölçümü.	32
Resim 3.6 Homojen harcın küp kalıplara yerleştirilmesi.....	33
Resim 3.7 Homojen harcın plaka kalıplara yerleştirilmesi.	33
Resim 3.8 Homojen harcın plaka kalıplara yerleştirilmesi.	34
Resim 3.9 Duvar panel kalıpları (800x340x100 mm).	34
Resim 3.10 Harç yerleştirilmiş duvar panel kalıbı.....	35
Resim 3.11 Numunelerin buhar kürüne tabi tutulması işlemi.	35
Resim 3.12 Numunelerin etüv kurusu hale getirilmesi.....	36
Resim 3.13 Homojen harcın ölçüm kabına doldurulması ve tartım yapılması.....	36
Resim 3.14 Marsh konisi ile kıvam analizi.....	37
Resim 3.15 Yayılma tablası (a), yayılma tablası ile kıvam analizi (b).	38
Resim 3.16 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerin etüv kurusu ağırlık tartım işlemi.	39
Resim 3.17 Rölatif uzunluk değişimi için kullanılan kalıplar.	40
Resim 3.18 Rölatif uzunluk değişimi için üretilen numuneler.	40
Resim 3.19 Kür havuzundaki köpük beton numuneleri.....	41
Resim 3.20 Numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümlerinin yapılması.....	42
Resim 3.21 Numunelerin kılcal su emme deneyi ölçümlerinin yapılması.	43
Resim 3.22 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerin basınç dayanım testi.....	44
Resim 3.23 40x40x160 mm numuneler için eğilme dayanımı testi uygulanması.	45
Resim 3.24 800x340x100 mm donatılı numuneler için eğilme dayanımı testi uygulanması.	46
Resim 3.25 Zamana bağlı yüzey geçiş sıcaklığı simülasyon testi için üretilen 300x300x50 mm plaka numuneler.	47
Resim 3.26 Pürmüz ile zamana bağlı yüzey sıcaklığı geçiş simülasyon deneyi.	48
Resim 3.27 Ses kutusu ile akustik özellik simülasyon deneyi.....	49

Resim 3.28	Kutu kapalı haldeyken akustik özellik simülasyon deneyi.	49
Resim 3.29	Derin dondurucuda -18 °C’de çevrime sokulan örnekler.	50
Resim 3.30	Donma işlemi sonrası suya doygun bekletilen örnekler.	51
Resim 3.31	Polarizan mikroskop.	51
Resim 3.32	Leo 1430 VP model elektron mikroskobu.	52
Resim 3.33	Shimadzu XRD-6000 model XRD cihazı.	52



1. GİRİŞ

Beton muhtevasında boşluk oluşturma farklı yöntemleri bulunmakta ve elde edilen boşluklar sayesinde betonların birim ağırlıkları düşürülebilmektedir. Bu metotlarla elde edilen ve birim ağırlığı 2000 kg/m^3 'ten az olan beton sınıfı hafif beton olarak adlandırılmaktadır (Baradan vd. 2015). Hafif beton elde edilmesi için birim ağırlığın azaltılması 3 farklı yöntemle yapılabilmektedir. Bu metotlar;

- Normal ağırlığa sahip agrega kullanımı yerine boşluğa sahip doğal veya yapay agrega ilavesiyle üretilen hafif betonlar,
- Beton muhtevasında kimyasal madde kullanılması ile betonun yapısında gözenekler oluşturarak elde edilen köpük beton ve gaz beton ile yüksek oranda hava sürüklenmiş betonlar.
- Normal agregadan elde edilen betonun içerisine katılan ince agreganın içerikten çıkarılmasıyla üretilen kumsuz hafif betonlardır (Türkel 2007).

Üretim yöntemleri arasında en yaygın kullanıma sahip olan yöntem ise hafif agrega kullanımı yoluyla olmaktadır. Hafif betonlar üretildikleri agrega ismine veya kimyasalla elde edilen metoda göre isimlendirilmektedirler. Bunlar; uçucu kül betonu, geliştirilmiş kil betonu, köpük beton, gaz beton gibi isimler almaktadır.

Günümüz dünyasında küresel ısınmanın artması ve ısıtma soğutma maliyetlerinin yükselmesi neticesinde enerji tüketiminde verimlilik esas alınmaya başlanmıştır. Dünyada tüketilen enerjinin büyük bir kısmının konutlar tarafından kullanıldığı bilinmektedir. Enerji tüketimine karşı israfa karşı önlemler alınması, daha az tüketim ile yeterli verimliliğin sağlanması konuları günümüzde önem teşkil etmektedir. İnşaat sektörü enerji kaynaklarının verimsiz kullanılmasında ve küresel ısınmadaki payı sebebiyle neden olduğu bu olumsuz durumları en aza indirgeyebilmek için doğa dostu, doğal kaynakların aşırı tüketimine karşı olan, sürdürülebilir ve yenilenebilir inşaa anlayışı olan yeşil bina kavramını geliştirmektedir.

1.1 Çalışmanın Önemi

Uçucu kül çok uzun zamandan beri depolanması ve çevreye verdiği zarar açısından büyük bir sıkıntı oluşturmaktadır. Bu atık maddenin bertaraf edilebilmesi, çevreye verdiği zararın en aza indirgenmesi ve faydalı hale getirilebilmesi için yıllardır araştırmacılar çalışmalar yapılmakta ve inşaat sektöründe kullanılmakta olan beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmasına çalışılmaktadır. Günümüzde hazır beton santralleri belirli ölçülerde beton üretiminde kullanmasına rağmen uçucu kül üretimine kıyasla yeterli bir tüketim sağlanamamaktadır. Bu sebeple yeni üretim sahalarının bulunması gerekliliği oluşmuştur. Bu çalışmada, binalarda inşaat aşamasında kullanımı halinde ekstra bir yalıtım gerektirmeyen köpük beton üretiminde uçucu kül kullanımının sağlanması ile çevreye duyarlı bir yapı malzemesi elde edilmesinin önemi büyüktür. İstenen mukavemet ve yalıtım özelliklerinin sağlandığı bir köpük beton elde edilmesi halinde ekonomik bir değeri olmayan uçucu külün kullanılması ile hammadde kullanımının azalmasından, istenen mukavemete ve yüksek yalıtım değerlerine sahip bir köpük beton türü elde edilmiş olmasından dolayı ülke ekonomisine katkı sağlayacak olması ayrıca bu çalışmaya önem kazandırmaktadır.

Bu çalışmada; farklı oranlardaki uçucu kül kullanımının, taze harç özelliklerine etkisi ve fiziksel, mekanik, fonksiyonel ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Hasır donatıya sahip köpük beton duvar panellerinin üretimi tasarlanmıştır. Elde edilen sonuçların birbirleriyle olan bağlantıları değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

1.2 Araştırma Kapsamı

Araştırma kapsamında uçucu kül katkılı köpük beton özelliklerinin incelenmesi ve binalarda hem iç hem dış duvarlarda kullanılabilecek, köpük betondan mamul, taşıyıcı olmayan, donatılı duvar elemanı üretimi hedeflenmiştir. Hazırlanan reçetelerde kontrol numunesi ve farklı oranlara sahip uçucu kül katkı kullanılan köpük beton örnekler üretilmiştir. Üretilen örnekler buhar kürüne tabi tutularak kürlenmesi sağlanmıştır. Numunelere ayrıca 7, 28 ve 90 gün süresince kür uygulanmıştır. Nihai ürünler üzerinde testler yapılmış olup termal özellikler belirlenmiş, fiziksel ve mekanik özellikleri elde edilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Bu bölümde köpük beton ile ilgili olarak üretim yöntemleri, avantajları, fiziksel özellikleri gibi bilgilerden bahsedilmiştir.

2.1 Köpük Beton

TS 13655'e standardına göre köpük beton; kireç ve/ veya çimento gibi hidrolik bağlayıcının, silis esaslı ince malzeme, gözenek (kapalı boşluk) oluşturan malzeme ve su ile karıştırılmasıyla imal edilen kargir birim olarak tanımlanmıştır. TSE K 600 standardında ise bünyesinde düzgün dağıtılmış halde, 0,1 mm ila 1,0 mm çaplı, yüksek oranda hava boşluğu oluşturulmuş beton olarak tarif edilmektedir. Köpük betonun bünyesindeki hava boşluğu oranı, bünyesinde bulunan katı maddeye oranla %20 daha fazla olmaktadır.

Köpük beton fiziksel, mekanik ve termal özelliklerinden dolayı günümüzde daha sık kullanılmaya başlanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Hafif bir yapıya sahip olan köpük beton, ısı yalıtım özelliği ve ses geçirmezlik özellikleriyle hem bina inşaatı hem de yol köprüsü uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Song vd. 2024). Yanması zor bir malzemedir, iyi ısı yalıtımı ve yangına direnç özelliklerine sahiptir. Gözenekli yapısı, sertleşmeden önce çimento harcının önceden hazırlanmış köpükle homojen şekilde karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır (Dudhe vd. 2023). Kendiliğinden yerleşme ve yayılma yeteneğine sahip ve herhangi bir vibrasyon yapılmasına gerek bırakmayan hafif beton sınıfında yer alan bir beton çeşididir. Hava sürükleyici veya köpük katkısı ilavesiyle yoğunluğu azaltılan bir betondur (Ramamurthy vd. 2009). Kullanım alanları olarak; ses ve ısı yalıtımı gerektiren yerlerde, çatı yalıtımı amaçlı olarak, köprü inşaatı ve köprü yaklaşımlarında dalgalanmanın önlenmesi amaçlı, yol yapımlarında, yumuşak zeminlerin taban kısımlarında, farklı altyapı uygulamalarında, fiber katkılı beton üretimlerinde ve yerinde döküm uygulamalarında, duvar blokları üretimlerinde kullanılmaktadırlar (Görhan vd. 2008). Köpük beton, hafifliği, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, üstün reolojik ve termal yalıtım özellikleri sayesinde normal betondan ayrılmaktadır. Köpük betonun geleneksel

betona göre daha düşük üretim ve taşıma maliyetleri sunması ekonomik açıdan avantaj sağlamaktadır (Shankar vd. 2023). Ayrıca, köpüklü beton, yapısal bileşenlerde kullanılabilir, böylece inşaat projelerinde esneklik ve performans arttırmaktadır.

Geri dönüşüm, depolama ve doğrudan atık bertarafı geleneksel atık malzeme yönetimi yöntemleridir. Atık malzemelerin çöplüklere ve depolama sahalarında toplanması, genel olarak oldukça maliyetli olan sağlık problemlerine ve çevresel sorunlara sebep olmaktadır. Atık malzemelerin açık alanlarda depolanmasıyla ilgili sorunlardan biri, yüzey bitki örtüsünü olumsuz etkileyen toksik gazların üretilmesidir (Liu vd. 2023, Revilla-Cuesta vd 2022, Mehdizadeh vd. 2023) . Büyüyen küresel ekonomi ve artan dünya nüfusu, yeşil enerji, düşük karbonlu çevre koruma ve sürdürülebilir kalkınma politikalarına olan talebin artmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, bu politikaların teşvikinde bir artış olmuştur (Li vd. 2022, Santos ve Silva 2017). Köpük beton bloklar çevre dostu ürünler olarak bilinmektedirler. Köpük beton üretiminde tüketilen enerji geleneksel kırmızı kil tuğlanın üretimine kıyasla çok düşük gerçekleşmektedir. Çevreye atık veya toksik madde yaymaz. Çimento, ince kum, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb. malzemelere su ilave edilip mikser marifetiyle karıştırılarak akıcı kıvamda elde edilen harç, muhtevasına kararlı hale getirilmiş köpük ilave edilmesi yoluyla elde edilir. Taze betonun içerisine köpük ilave edilerek sertleşen bünyede milyonlarca küçük boşluk veya gözenek oluşturulur, bu sebeple köpük beton olarak adlandırılır (Siram 2012). Köpük beton; hacminin en az % 20'sinde hava boşluğu bulunduran, çimento esaslı, çok amaçlı kullanım alanına bir hafif betondur. Akış kabiliyetinin yüksek oluşu, birim ağırlığının düşüklüğü, agrega tüketiminin çok düşük seviyede olması, kontrollü olarak düşük mukavemet sınıflarıyla birlikte yüksek değerlere sahip ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahiptir. Genel olarak kuru birim ağırlığı 400-1600 kg/m³ arasında olmakla birlikte basınç mukavemetleri ise 1-15 MPa arasında üretilmektedir. Köpük beton kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip olup vibrasyon ve sıkıştırma gerektirmez, gerek duyulması durumunda pompalanabilmektedirler (Jones ve Mccarthy 2005).

Köpük beton, çok sayıda kapalı hava boşluğuna sahip hafif bir beton türüdür ve beton harcına uygun şekilde önceden üretilmiş köpük eklenerek elde edilmektedir. Köpük

betonun hafif yapısı, üstün yalıtım özellikleri ve yangına dayanım gibi özellikleri nedeniyle, yapısal ve yapısal olmayan amaçlar için inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Köpük beton farklı amaçlar için kullanılabilir, bunlar; duvar elemanları, yalıtım amaçlı hafif bloklar ve önceden dökülmüş panellerin üretimi olarak sıralanabilmektedir. Araştırmalar köpük betonun mekanik özellikleri, dayanıklılığı, ısı iletkenliği, ses emilimi ve adsorpsiyon özelliklerinin gözenekli yapısıyla yakından ilişkili olduğunu göstermiştir (Chen 2023). Köpük betonda uçucu kül kullanımı sayesinde hava kabarcıkları üzerinde kaplama yapmasından kaynaklı olarak mikro gözenekler oluşur ve gözeneklerin birbirleriyle birleşmesini önleyici etkiye sahiptirler. Köpük ajanının yüksek oranda kullanılmaması gerekmektedir, bunun sebebi olarak ise bünyede elde edilen gözeneklerin birleşmesine ve oluşan iri gözenekler sebebiyle, elde edilen numunelerde düşük basınç mukavemetine yol açmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy 2007 b, Visagie ve Kearsley 2001). Köpük betondan istenen basınç dayanımı gözenek miktarı, çimento harcındaki karışım oranı, porlar arası mesafe ve por sayısından etkilenmektedir (Wee vd. 2006, Kearsley ve Visagie 1999, Nambiar ve Ramamurthy 2007 b). Köpük beton yapısındaki gözenekler küresel yapı ve 50 mikrometre çapında olup bu sayede normal betona göre daha az su geçirgenliğine sahiptirler (Neville 1995). Köpük betonun üretimde kullanılan malzemelerin hangi türden olduğu, kullanılan su-bağlayıcı veya su-çimento oranı, uygulanan kür süresinin uzunluğu ve köpük elde etmek için suya ilave edilen köpük ajanı dozunun üretilen köpük beton özelliklerinde önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır (Ramamurthy vd. 2009).

Köpük beton, betondaki hava boşluklarının mekanik köpürtme veya kimyasal köpürtme maddeleri (H_2O_2 , alüminyum tozu) ile hapsedilmesiyle üretilir. Köpük betonun genel performansı, gözenek yapısının homojenliği ve boyut dağılımına yakından bağlıdır. Köpük beton, mükemmel termal ve akustik yalıtım özellikleri, hafif yapısı ve yangın geciktiriciliği nedeniyle düşük karbonlu binaların inşasında enerji tasarrufu sağlayan bir bileşen olarak yaygın olarak kullanılmaktadır (Lv vd. 2023)

2.2 Köpük Betonun Tarihçesi

Köpük betonun tarihsel gelişiminde başlangıç noktası olarak 1914 yılında Aylsworth ve Dyer tarafından patentinin alınması kabul edilmektedir (Nambiar ve Ramamurthy 2007).

1923 yılında Axel Ericsson tarafından yalıtım malzemesi olarak kullanılması amacıyla patenti alınmış ve 1923 yılına kadar köpük betonda önemli bir gelişme sağlanmamıştır (Beningfield vd. 2015, Jones vd. 2005).

Köpük beton üretiminin başladığı yıllarda yalıtım ve dolgu malzemesi olarak kullanımı amaçlanmıştır (Valore 1954). Fakat zamanla köpük betonun yapısından kaynaklı özellikler sayesinde uçucu kül, silis dumanı gibi atık malzemelerin de kullanımına uygun olduğu görüldükçe kullanıma dönük olarak ilgi artmıştır (Ramamurthy vd. 2009).

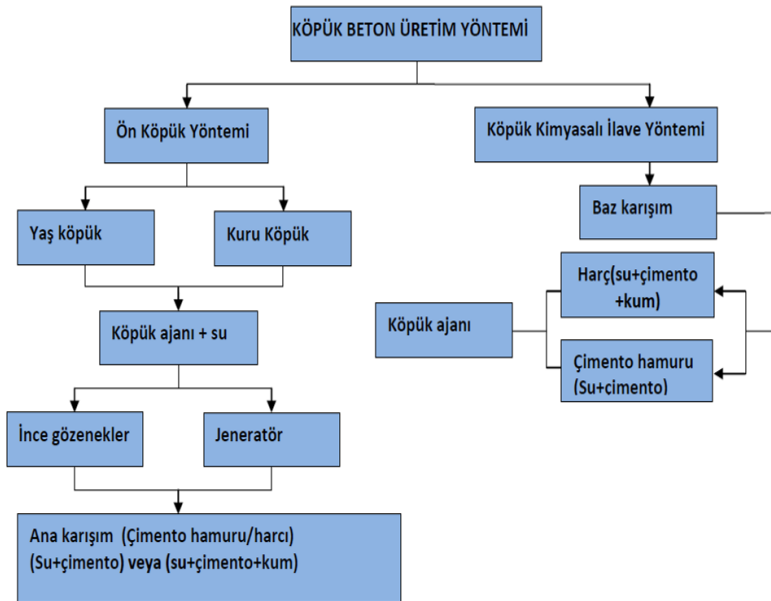
Günümüzde köpük beton üretimine yönelik teknolojik ekipman gelişimi ve kimya endüstrisinin gelişimi sayesinde kullanılan üst düzey köpük ajanları köpük betonun daha geniş bir kullanım sahasına kavuşmasını ve daha büyük boyutlu üretimine olanak sağlamıştır (Khayat ve Assaad 2002).

2.3 Üretim Yöntemleri ve Karışım Oranları

Köpük beton üretiminde kullanılmakta olan birbirinden farklı iki yöntem vardır: Bunlardan birincisi ön köpük üretim yöntemi ve ikinci olarak da karışıma köpük ajanı ilave yöntemidir (Mohammed ve Hamad 2014). Ön köpük üretim yöntemi karışıma köpük ajanı ilave etme yöntemine göre çok daha ekonomik ve daha kolay bir yöntem olduğu için daha fazla tercih edilmektedir. Ön köpük yönteminde önceden üretilen köpük, harç içerisine katılarak homojen karışım elde edilinceye kadar karıştırılarak köpük beton elde edilir. Önceden üretilen harç homojen hale gelene kadar karıştırılır, içerisine eklenmesi gereken katkı maddeleri vs. varsa ilave edilir tekrar homojen hale gelmesi beklenir ve en son işlem olarak köpük eklenerek işlem tamamlanır. Harç içerisine konan köpüğün yeterince kararlı olması, çimentonun priz başlangıcına kadar harcın oluşturduğu basınca karşı koyabilmesi ve gözenekli bir iskelet yapısı kazanabilmesi için yeterince katı, sıkı ve kararlı olmalıdır (Ramamurthy vd. 2009).

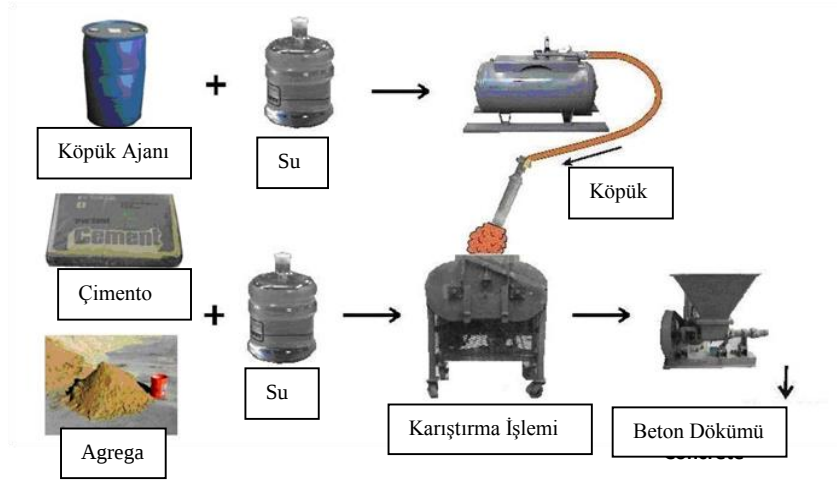
Köpük üretiminde iki yöntem kullanılabilir. Bu yöntemler yaş köpük ve kuru köpük olarak adlandırılmaktadırlar. Yaş köpük yönteminde kullanılacak olan köpük ajanı su ile seyreltilme işlemine tabi tutulduktan sonra hasır üzerine püskürtülerek, 2 ile

5 mm arasında bir çaplı gözeneğe sahip köpük elde edilmektedir. Elde edilen köpüğün gözenek çaplarının çok büyük olması sebebiyle düşük yoğunluklu köpük betonların imalatında kullanımı uygun bulunmamaktadır (Ören ve Gençel 2017). Diğer yöntem olan kuru köpük yönteminde ise köpük ajanı su ile seyreltildikten sonra köpük üretme makinesindeki basınçlı hava marifetiyle kanaldan geçerken köpüğe dönüşmektedir. Elde edilen köpük gözenek boyutu yaş yöntemdeki gözenek boyutuna göre çok daha küçük olup, çapı 1 mm'den daha az olmaktadır (Kuzielova vd. 2016). Kuru köpük metodu gözenek çaplarının daha küçük ve daha kararlı bir yapıya sahip olmasından dolayı kullanımı daha yaygın olan bir metottur. İkinci yöntem ise mevcut harç bileşenleri içine yüzey aktif ajan ilave edilerek homojen dağılım sağlayıncaya kadar karıştırılır ve köpük beton harcı elde edilir (Byun vd. 1998). Bu yöntem verimli olmadığından ve daha çok miktarda ajan kullanılması gerekmesinden dolayı çok tercih edilmemektedir. Şekil 2.1'de köpük beton üretim yöntemleri şeması sunulmaktadır (Mohammed ve Hamad 2014).



Şekil 2.1 Gözenekli beton ve köpük beton üretim yöntemleri (Mohammed ve Hamad 2014).

Köpük beton üretim süreciyle ilgili köpük ajanı ilave edilmek suretiyle köpük üretim makinası kullanarak köpük elde edilmesi ve hammaddelerin mikserde karıştırılmak suretiyle homojen hale getirilmesi ve daha sonrasında köpük betonun üretilmesiyle ilgili örnek Şekil 2.2' de gösterilmiştir (ACI 523.3r-14).



Şekil 2.2. Köpük beton karıştırma ve üretim sürecine ilişkin örnek (ACI 523.3r-14).

Köpük beton, istenen akışkanlık ve sıkıştırılabilirliği sağlamak için, su içeriğinden ve katılan köpük miktarından kısmen etkilenecek, kendiliğinden yerleşen betona benzer şekilde tasarlanır. Genellikle istenen özelliklere sahip köpük beton elde etmek için deneme ve yanılma süreci benimsenmiştir. (Nehdi vd. 2001)

Koyu kıvamda hazırlanmış bir beton karışımı, elde edilen gözeneklerin patlamasına neden olabilirken, akışkanlığı yüksek olarak üretilmiş bir harç karışımı ise bünyesindeki gözenekleri tutma yeteneğini kaybederek ayrışmaya neden olabilir. Bu sebeple kararlılığı sağlamak için yoğunluk oranları (örneğin, taze beton yoğunluğu ve sertleşmiş beton yoğunluğu oranları) 1:1 yakın olmalıdır (Ramamurthy vd. 2009).

Karışıma kum ikame edilmesi planlanıyorsa en yüksek tane boyutu 2 mm olmalı ve % 60-90'nının 600 µm eleğin gözlerinin altına geçmesi gerekmektedir. Harcın su/bağlayıcı oranı (S/B) genellikle 0.5 ile 0.6 arasında olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Ancak bileşenlerin özelliklerine göre bu oran 0.4-1.25 arasında değişiklik gösterebilmektedir (Jones ve McCarthy a 2005, Jones ve McCarthy b 2005).

2.4 Köpük Betonun Avantajları

Yapıda kullanılan çeliğin, yangın ve aşınma gibi dış etkenlere karşı korunması veya tasarımsal olarak kaplama malzemesi amacıyla hafif betonlar kullanılmaktadır. Duvar ve çatılarda genel yalıtım amacıyla da kullanılmaktadır. Yakıt depoları, kanalizasyon

boru hatları ve menfezler gibi boşlukların doldurulması amacıyla da hafif betonlar kullanılmaktadır. Hafif beton kullanımının avantajları arasında ilk sırada birim ağırlığın önemli ölçüde düşük olması ve enerjide tasarruf sağlamasıdır. Hafif betonlar üstün ısı iletkenlik ve yangın direnci özelliklerine sahip betonlardır (Yılmaz vd. 2021)

Köpük betonun normal betona sınıflarına göre belirgin üstün özellikleri vardır (Ramamurthy vd. 2009, Wee vd. 2006).

Bu özellikler;

- Kendiliğinden yerleştiği için herhangi bir vibrasyon veya sıkıştırma gerektirmez.
- Hafif yapıya sahip olmasından dolayı aşırı yükler getirmez.
- Serbest şekilde akarak tüm boşlukları doldurarak yayılma sağlar.
- Etkiyen yükleri homojen şekilde yayma özelliğine sahiptir.
- Döküm yapıldıktan sonra herhangi bir bakım gerektirmez.
- Yapıya yüksek yanal yük etkisi olmaz.
- Güvenilir kalite kontrolüne sahiptir ve numunelerin tekrar imali kolaydır.
- Donma- çözünme etkisine karşı dayanımı yüksektir.
- Zamana bağlı olarak su emme oranı düşüktür.
- Uygulandıktan sonra ve hizmet ömrü süresince tehlikeli olabilecek madde içermemektedir.
- Farklı metotlarla karşılaştırılması yapıldığında daha düşük maliyetlidir.
- Birçok uygulama için yeterli dayanıma sahiptir.
- Üstün ısı ve ses dayanımına sahiptir.

2.5 Köpük Betonun Dezavantajları

Köpük betonun yaygın üretim ve uygulanmasında bir takım zorluklar bulunmaktadır; Hidrofilik ve oldukça gözenekli yapısı sebebiyle düşük mukavemete sahiptirler, köpük betonun bünyesinde oluşan baloncukların doğal kararsızlığı nedeniyle zor olmaktadır. Ayrıca mekanik mukavemet ile hafiflik ve termal özellikler gibi istenen işlevsellikler arasında uyumsuzluklar olabilmektedir (Tran vd. 2022). Bünyesinde bulunan gözeneklerin fazla olması basınç dayanımını düşürebilmektedir. Segregasyon

olayı köpük betonlarda normal betona oranla daha yüksek olabilmektedir. Muhtevadaki gözeneklerin ayrışarak yüzeyde toplanması ve karışımında bulunan malzemenin dibe çökmesi durumu söz konusu olabilmektedir. Rötne değeri normal betona oranlandığında daha yüksek olmaktadır. Aşınmaya karşı dayanım düşüktür (Raj vd. 2019, Bayraktar vd. 2021).

2.6 Köpük Betonun Kullanım Alanları

Köpük betonların kullanılabileceği alanlar sahip oldukları avantajlı özellikler sebebiyle çok çeşitli olmaktadır. Köpük betondan panel imal edilerek dekorasyon amaçlı olarak kullanılabilmektedir. Köprü ve köprü yollarında kış aylarında meydana gelen buzlanmanın önüne geçmek amacıyla yol altı dolgu betonu olarak kullanılmakta ve köprünün yükünün azaltılmasına da yardımcı olmaktadır (Awana ve Kumar 2017). Prefabrik binalarda bölme duvarlar için blok ve panel olarak kullanılabilmektedir. Zemin düz olmayan yapılarda düz bir zemin oluşmasını sağlayarak, ses ve ısı yalıtımı sunan bir zemin elde etmek için şap betonu olarak kullanılabilmektedir (Bekaroğlu 2012). Bünyesinde bulundurduğu kapalı gözeneğe sahip hava boşlukları sayesinde ısıya karşı yüksek dayanım sağlamasından kaynaklı olarak yangın riski içeren bölgelerde bölme duvar olarak kullanım özelliğine sahiptir. Düz çatıların eğimli bir yapıya kavuşturulması istendiğinde ve çatıda yalıtım sağlamak amacıyla binalarda yer bulmaktadır.

2.7 Köpük Betonun Sınıflandırılması

Köpük betonlar, birim hacim kütlesi sınıfları, basınç dayanımları sınıfları, ısıl iletkenlik katsayısı sınıfları ve duvar kalınlık sınıfları olarak 4 farklı şekilde sınıflandırılabilirler. Birim hacim kütle sınıfları numunelerin kg/m^3 cinsinden ağırlıklarına göre 5 farklı aralıkta değerlendirilmektedir. Basınç dayanımı sınıfları birim hacim ağırlık sınıfları dikkate alınarak N/mm^2 cinsinden 5 farklı aralıkta sınıflandırılmaktadır. Isıl iletkenlik katsayısı sınıfları da yine birim hacim ağırlık sınıflandırması esasına dayalı olarak numunelerin W/mK biriminden değerlerine göre 5 farklı aralıkta sınıflandırılması yapılmıştır. Duvar kalınlık sınıfları ise iç duvar ve dış

duvar olarak iki farklı kısma ayrılmış ve köpük betonun uygulanacağı yere göre cm biriminden standartları belirlenmiştir. Bu aralıklar birim hacim kütlesi için 300-1800 kg/m³ aralığında, basınç dayanım sınıfı için 1.3-12 N/mm² aralığında, ısı iletkenlik katsayısı için 0.080-0.43 W/mK aralığında belirlenmiştir. Duvar kalınlıklarına göre ise dış duvarlar için 20-25 cm, iç duvarlar için 10-15 cm olarak iki sınıfa ayrılmıştır (TSE K 314 2014).

Köpük betonlar bir hafif beton çeşididir. Hafif betonlar birim ağırlıklarına ve işlevlerine göre üç farklı şekilde sınıflandırmıştır (Taşdemir 2003);

- Yalıtım esaslı hafif betonlar: 250 ile 800 kg/m³ arası birim hacim ağırlığa,
- Orta dayanımlı hafif betonlar: 800 ile 1400 kg/m³ arası birim hacim ağırlığa,
- Taşıyıcı hafif betonlar: 1400 ile 2000 kg/m³ fazla birim hacim ağırlığa sahip betonlardır.

Şekil 2.3'e göre köpük betonlar yalıtım betonu, orta dayanımlı beton ve kısmen taşıyıcı hafif betonlar sınıfına girmektedir (Taşdemir 2003).

Birim Ağırlık (kg/m ³)	Yalıtım Betonları			Orta Dayanımlı Betonlar		Taşıyıcı Hafif Betonlar		
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Dayanım Aralığı	(0.7-2.0 MPa)			(7-14 MPa)		(17-41 MPa)		
Agrega Tipi	Vermikülit			Ponza		Sinterlenmiş UK		
	Perlit			Volkanik Curuf		Genişletilmiş Kil veya Şist		
	Gaz ve Köpük Betonlar					Genişletilmiş Curuf		
Diğer Hafif Betonlar				Hafif Beton		Normal Beton		

Şekil 2.3 Hafif betonların işlevlerine göre sınıflandırılması (Taşdemir 2003).

Birim ağırlığı 800 kg/m^3 'den küçük olan hafif betonların basınç dayanımları genellikle 0,7-2 MPa aralığında olduğunu ve yalıtım amacı ile kullanılabileceğini belirtmiştir (Konuk 2003).

Çizelge 2.1 Hafif betonların sınıflandırılması (Taşdemir 2003).

Hafif Beton Sınıfı	Yalıtım Esaslı Betonlar	Orta Dayanımlı Betonlar	Taşıyıcı Hafif Betonlar
BHA (kg/m^3)	250-800	800-1400	1400-2000
Basınç Dayanımı (MPa)	0,7-2	7-14	17-41
Agrega tipi	Vermikulit, perlit	Ponza volkan tüfü	Sinterlenmiş UK Genleştirilmiş kil veya şist Genleştirilmiş cüruf
Diğer Hafif Betonlar	Gaz ve Köpük Beton	Gaz ve Köpük Beton Kumsuz Beton (Hafif Beton)	Gaz ve Köpük Beton

2.8 Köpük Beton Özellikleri

Sertleşmiş köpük beton özellikleri üç grupta toplanabilir (Hamidah vd. 2005). Bunlar:

1. Fiziksel Özellikler: Kuruma küçülmesi, yoğunluk, gözenek oranı ve gözenek yapısı, su emme vb.
2. Mekanik Özellikler: Basınç dayanımı, eğilme dayanımı vb.
3. Fonksiyonel Özellikleri: Isı ve ses iletim özellikleri, yangın dayanımı vb.

2.9 Taze Beton Özellikleri

Çimento esaslı bütün malzemelerin taze haldeki durumları geçici olsa da, betonun son durumundaki performansı, yani sertleşmiş beton özellikleri üzerinde büyük rol oynamaktadır (Banfill 2003). Taze halde olan çimento temeline sahip malzemelerin taze hal durumu, kendi özellikleri ile tarif edilmektedir (Hanehara ve Yamada 2008).

2.9.1 Taze Birim Ağırlık

Taze birim ağırlıkta karışıma giren bileşenler, S/B oranı, karışıma giren bileşenlerin oranları ve ilave edilen köpük miktarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Ayrıca Karışıma giren köpük stabilitesi taze birim ağırlık belirlenmesinde etkili rol oynamaktadır. Buna bağlı olarak, taze birim ağırlık ile kuru birim ağırlık arasında ve numune stabilitesinde önemli bir ilişki bulunmaktadır (Işıldar 2023).

2.9.2 Marsh Konisi ve Yayılma Tablası

Akış konisi marifetiyle taze harcın akış süresini ve yayılma konisi testi uygulanarak köpük betonun kıvamının tespiti mümkün olmaktadır. Akış süresi ve yayılma konisi kullanılarak akış süresi ve yayılma testleri köpük betona uygulanabilmektedir. Karışımındaki ince madde miktarının artması ile birlikte kıvam değerinde düşme gerçekleşir. Karışımındaki katı halde bulunan tanecikler ile köpük üretimiyle karışıma giren kabarcıklar arasındaki adezyon kuvvetleri taze harcın kıvamını artırmaktadır (Karl ve Worner 1993).

Köpük beton içerisinde yüksek oranda hava gözenekleri olması dolayısıyla işlenebilirliği oldukça yüksek olup akıcı kıvama sahiptir ve homojen karışım elde edilmesi kolay, ayrışma ve terleme yapmayan bir yapıya sahip olmasından dolayı kalıpta herhangi bir sarsma veya titreşime ihtiyaç duymadan kendiliğinden kolayca yerleşebilmektedir (Basiurski 2000).

2.9.3 Kararlılık

Akışkanlık oranı diğer betonlara göre daha yüksek olan köpük betonda, beklenen düzeyde bir gözenek yapısı elde etmek için kararlılık en önemli unsurlardan biri olmaktadır. Köpük beton üretim aşamasında harcın karıştırılması, üretim sonrası yerleştirme ve kalıpta iken harcın priz alması esnasında kararlılığını muhafaza edebilmelidir. Köpük betondaki kararlılık ayrışma ve terlemeye maruz kalmadan, kıvam ve yoğunluk bakımından yaklaşık aynıdır. (Aldridge 2005).

Sentetik köpük ajanı kullanılarak üretilen köpüklerin gözenek ebatları daha iri ve açık gözenekli olmakta, protein kökenli imal edilen köpük kimyasallarının ise sentetik ajan kullanmak suretiyle elde edilen köpüğe göre daha kararlı olduğu görülmektedir (McCarthy 2004). Ayrıca yüzeydeki etkiyen yükler, karışımdaki serbest su içeriği, uçucu kül ve kimyasal katkıları köpük kararlılığını etkileyen etkenler olarak belirlenmiştir (Jones ve McCarthy 2006).

2.10 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Sertleşmiş beton özellikleri sınıflandırma olarak fiziksel, mekanik dayanım ve fonksiyonel özellikleri olarak sınıflandırılmaktadır (Ramamurthy vd. 2009). Köpük betonun kuruma büzülmesi değeri, birim hacim ağırlık, su emme yüzdesi, gözeneklilik fiziksel özellikleri içerir. Basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı tayini ve eğilmede çekme mukavemetleri gibi testler mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Isı iletkenlik değeri, akustik özellikleri ve yangın direnci ise fonksiyonel özellikleri altında sınıflandırılmaktadır. (Mohammad 2011).

2.10.1 Fiziksel Özellikler

2.10.1.1 Birim Ağırlık

Köpük betonun birim ağırlığı hem taze haldeki harç için hem de sertleşmiş haldeki beton için ayrı ayrı belirlenmektedir. Taze haldeki birim ağırlığı, hedeflenen karışımın tasarımı ve dökülen betonun kontrolün sağlanması için gereklidir. Ayrıca köpük betonun fiziksel özelliklerinin birçoğu taze haldeki birim hacim ağırlığa bağlı ve ilişkili olmaktadır (Ramamurthy vd. 2009). Düşük yoğunluk nedeniyle, köpük beton alt taban üzerinde küçük eksenel basınç uygular. Dolgu betonları, çatı betonları vb. zemin dolgularında yoğunluğu 1000 kg/m³'ü aşan köpük beton kullanılır. Köpük beton hidrasyondan sonra iyi bağlanmış sağlam bir bünye yapısına sahip olmaktadır. Yeterince mukavemet kazandıktan sonra oluşan bu monolitik yapı komşu malzemelere yanal yük vermemektedir (Jones ve McCarthy 2005).

Birim ağırlığı etkileyen faktörlerin başında karışım dizaynında kullanılan bileşenler ve oranları olup, köpük betonun birim ağırlığı üzerinde oluşan asıl etkinin köpük ajanı tipi ve miktarından kaynaklı olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca köpüğün kararlılığına bağlı olarak karışım içerisinde bulunan kabarcıkların stabilitesini koruyamayıp patlaması kuru yoğunluğun artışına sebep olduğu bilinmektedir (He vd. 2019).

2.10.1.2 Rölatif Uzunluk Değişimi

Beton bünyesinde bulunan suyun fiziksel ve kimyasal olarak bünyeden uzaklaşması neticesinde betonun boyutlarında oluşan küçülmeye büzülme (rötre) adı verilmektedir. Köpük betonun içeriğinde agrega bulunmamasından ötürü kuruma küçülmesinde oluşabilecek rötre miktarı normal betona göre 10 kat kadar daha fazla olabilmektedir. Otoklav kürü uygulamasının mineralojik yapıyı değiştirdiği ve buhar kürüne göre rötreyi %12 ile %50 oranında azalttığı görülmüştür. Köpük betonlarda rötre miktarı, yoğunluğun düşmesiyle birlikte artma eğilimi göstermektedir. Rötrenin köpük betonda normal betona göre yüksek oranlara çıkması kısmen daha yüksek çimento oranı, su miktarının yüksekliği, ince taneli agrega oranının yüksek oluşundan kaynaklanmaktadır. Muhtevadaki köpük miktarının artışı ve sıcaklık artışına da bağlı olarak rötre oranı artmaktadır (Gelim 2011).

Plastik büzülme taze betonda ilk birkaç saatte yüzeyin kuruması sebebiyle gerçekleşir. Plastik büzülmeden kaynaklanan çatlaklar yüzeyden başlar ancak betonun derinliklerine kadar inmez ve mukavemete kötü yönde bir tesirleri bulunmamaktadır. Plastik büzülme; beton sıcaklığına, ortamdaki nem miktarına, hava sıcaklığına ve maruz kalınan rüzgar hızına bağlı olmaktadır (Erdoğan 2013).

Kuruma büzülmesi, sertleşmiş betonun içeriğindeki suyun bir kısmının buharlaşarak kaybolması sonucunda yer alan büzülme çeşididir. Bulunulan ortam sıcaklığının yüksek olması ancak nem oranının düşük olması ve rüzgar gibi şiddetli hava akışı olması halinde mevcut su zaman içerisinde bünyeden uzaklaşmaktadır. Betonun kuruması ile betonun hacminde büzülme meydana gelir. İlk aşamada mevcut su kaybı daha hızlı olmakla birlikte, kuru ortam sürdükçe bünyedeki suyun kaybı devam etmektedir (Demir

2014). Karbonatlaşmadan kaynaklanan rötreler haricindeki diğer rötre tüm türlerinin ana kaynağı bünyedeki suyun kaybindan kaynaklanmaktadır (Sahinagic- Isovici vd. 2012).

2.10.1.3 Su Emme

Sertleşmiş köpük beton içerisindeki gözenekler suya doymuş bir halde olmadığı durumda, su içerisinde iken köpük beton içerisindeki açık gözenekler su ile dolmaktadır. Bu durum, köpük betonunu tamamının suya doymuş hale gelmesi haline kadar devam etmektedir. Yapının tamamının içeriğine fiziksel olarak su çekmesine su emme denmektedir. Köpük betondaki su emme olayında iri gözenekler öncelikle su ile dolmakta daha sonrasında ise daha küçük gözeneklere su girişi gerçekleşmektedir. Buna bağlı olarak su emme durumu başlangıçta hızlı bir şekilde gerçekleşip sonrasında ise yavaşlamaktadır. Köpük betonun su emme durumunu karışıma giren malzemeler, oranları, içerikteki malzemelerin boşluk yapısı, gözenek çapları, köpük stabilitesi gibi etkenler belirlemektedir (Nergiz 2007).

2.10.1.4 Ultrases Geçiş Hızı

Mekanik dalgalar elektriksel titreşimlere dönüşerek ve elektriksel titreşimler de mekanik titreşimlere dönüşerek ultrasonik testlerin temelini oluşturmaktadır. Piezoelektrik vericiler bu sistemin birincil görevini üstlenmektedirler. Test cihazı betonda bir verici prob yardımı ile ses dalgası titreşimleri oluşturarak, problemler arasındaki hareketi ölçer. Bu sayede köpük beton boyunca ilerleyen titreşimin hareket süresini hassas bir şekilde ölçmek mümkündür (Özçep vd. 2012). Ultrasonik testler betonun mekanik özelliklerinin tahribatsız bir şekilde belirlenmesinde kullanılırlar.

2.10.1.5 Kılcal Su Emme

Köpük beton muhtevasında bulunan kılcal gözenekler, betondaki su emme kapasitesini artırmaktadır. Bu nedenle betona uygulanacak olan kür yöntemi elde edilecek sonuçlara etki edebilmektedir (Nambiar ve Ramamuthy 2007). Karışıma giren malzeme türü,

malzemelerin ve hammaddelerin özelliği, hangi oranda ilave veya ikame edildiği ile köpük betondaki gözenek yapısı belirlenecek olmasına rağmen ana unsur olarak köpük ajanının özellikleri kılcal su emmede etkin rol oynamaktadır. (Bodur vd. 2021).

2.10.2 Mekanik Özellikler

2.10.2.1 Basınç Dayanımı

Köpük betonun basınç dayanımına; karışımı oluşturan ana bileşenler, karışım oranları, yoğunluk, uygulanan kür yöntemi ve süresi, betonun yaşı gibi çok sayıda faktör etkili olmaktadır. Çimento-kum oranı, su/bağlayıcı oranı, uygulanan kür rejimi, kullanılan kumun tipi ve seçilecek tane boyutu, kullanılan köpük ajanının tipi köpük beton basınç dayanımını etkileyen önemli etkenlerdir (Aldridge 2005, Hamidah vd. 2005).

Köpük betonun 500 ve 1000 kg/m³ arasındaki kuru yoğunluğu için, basınç dayanımı gözenek çapının artması ile azalır. 1000 kg/m³'den daha yüksek yoğunluklarda, gözenek oranı basınç dayanımı üzerinde fazla etkili olmayıp, karışım harcına giren malzemelerin bileşimi basınç mukavemetinde belirleyici unsur olmaktadır.

Köpük betondaki basınç mukavemeti genel olarak üretilen betonun yoğunluğuna bağlı olarak değişir ve köpük betonun birim ağırlığında meydana gelen azalma ile mukavemetteki düşüş 10 kata kadar çıkabilir. Köpük betonun basınç mukavemeti birim ağırlığının bir fonksiyonudur (Ören ve Gençel 2017).

2.10.2.2 Eğilmede Çekme Dayanımı

Betondaki eğilmede çekme dayanımı, betonda yük altında gerçekleşen çekme etkisine neden olacak kuvvetlerin sebep olduğu şekil değiştirme ve kırılmalara karşı, betonun direnç göstermesi olarak tanımlanmaktadır. Betona doğrudan çekme dayanımı uygulanmıyor olmasına rağmen, betona etkiyen basınç ve eğilme kuvvetleri betonda çekme kuvvetleri oluşumuna neden olabilmektedir. Betonda rötire nedeniyle oluşacak olan kısalmalar, bünyede bulunan agrega taneleri ve betondaki donatı veya lifler

sayesinde engellenerek beton içerisindeki çekme kuvvetleri azaltılabilmektedir (Özden 2010).

2.10.3 Fonksiyonel Özellikleri

2.10.3.1 Isıl İletkenlik

Köpük betonlar, normal betona göre içerdikleri gözenekler sayesinde düşük ısı iletkenliğe sahiptirler. Bunun sonucu olarak ısı yeteneği ve enerji kaybı açısından tasarruf oranı yüksektir. Köpük betonun bu yapısı sayesinde enerji tasarrufu sağlayan yapılar olarak ısı izolasyon sağlayan malzemeler olarak kullanılabilirlik özellikleri bulunmaktadır (Koru 2017). Köpük betonların, Köpük betonların ısı iletkenlik değerleri, karışıma katılan köpüğün yoğunluğuna, köpük ajanı türüne, köpük ajanının oluşturduğu gözenek boyutu ve yapısına, üretilen malzemenin birim ağırlığına, içerikte kullanılan hammaddelerin oranlarına, S/B oranına, kür yöntemi gibi birçok değişkene bağlıdır (Raj vd. 2019).

2.10.3.2 Akustik Özellik

Ana faktör olarak karışıma giren köpük miktarına bağlı olarak değişkenlik gösteren gözenek oluşumlarının köpük betonda oluşan akustik yutmanın yüksek olmasına yol açtığı bilinmektedir. Elde edilen köpük tanelerinin yüzeylerinin uçucu kütle kaplanması sayesinde çekirdek ve kabuktan oluşan yapı elde edilmesi ile düşük ve yüksek frekans bölgelerinde ses absorpsiyonunda önemli bir etki göstermemiş olmasına rağmen orta frekanslarda absorpsiyonda gelişme gözlemlenmiştir (Shang vd. 2022).

2.10.4 Durabilite Özellikleri

2.10.4.1 Donma Çözülme

Ana bileşeni çimento olan beton, basınç dayanımı birçok malzemeye göre yüksek olmasına rağmen çekme dayanımı düşüktür, bu sebeple betonların çekme dayanımına

maruz kalması beton için olumsuz bir durumdur. Kış şartlarında kullanılan betonun yapısında bulunan ve hidrasyona katılmayıp serbest halde bünyede bulunan su dış etkenlere bağlı olarak donma çözülme etkisine maruz kalır. Bünyedeki suyun donma çözülme uğraması betonda iç gerilmelerine yol açar ve oluşabilecek çatlaklar sonucunda beton kullanılmaz hale gelir. Bundan dolayı betonun donma çözülme uğramaması istenir. Yapılan çalışmalara göre betonun içerisinde bulunan içi hava dolu gözeneklerin betonda oluşacak donma çözülme etkilerini azalttığı tespit edilmiştir. Beton içeriğinde bulunan gözeneklerin suyun donmasıyla oluşan hacim genişlemesini tolere edebildiği ve beton yapısına vereceği zararı önlediği anlaşılmıştır (Bryant 1990). Sertleşmiş betonun boşluklarındaki suyun donması sonucu ve sonradan çözünmesi ile "donma çözülme" olayı gerçekleşebilir. Bunun sonucunda beton çatlayıp kırılabilmektedir (Ezici 2016).

2.11 Gözenek Oranı ve Gözenek Yapısı

Köpük beton karışımları içerisine katılan köpük sayesinde harç içerisinde milyonlarca kapalı halde gözenek oluşmaktadır. Gözenekler 3 sınıfa ayrılmaktadırlar; jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve makro gözenekler. Bu gözeneklerin iri olmaması ve birbirinden bağımsız olması istenmektedir. Köpük betondaki gözenek boyut ve dağılımlarının normal betona göre farklı olması nedeniyle akustik özelliklerde gelişmeyi sağlamaktadır. İri gözenek oluşumunda basınç mukavemeti değerlerini olumsuz etkilediği görülmektedir. Gözenek çapları küçüldükçe mukavemet değerlerinde iyileşme sağlanmakta ve beklenen özellikleri karşılamaktadır (Yılmaz vd. 2021).

2.12 Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik santrallerin kullanmış olduğu düşük kaloriye sahip kömürün yakılması suretiyle meydana gelen atık bir üründür. Uçucu kül, kömürün 1200-1700 °C'de yakılması sonucu oluşan bir yan ürün olup, hem inorganik hem de organik bileşenler içermektedir. Yanma sürecinde kömürün içindeki organik bileşenler (karbon ve diğer kristal olmayan maddeler) yanarken, mineraller (kil, kuvars, feldspat vb.) baca gazlarında askıda kalır. Bu süreçte, tam olarak yanmamış bazı mineraller,

askıda kalan parçacıkların topaklaşmasıyla daha büyük, kaba parçacıklar haline gelir. Bu şekilde, uçucu kül, hem yanmış organik bileşenlerin kalıntısı hem de yanmamış inorganik minerallerin bir kombinasyonunu içerir (Güven 2024). Termik santrallerde pulvarize hale getirilerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı kül elde edilmektedir.

- Görece olarak iri tanelere sahip olan ve bacadan çıkan gazlar ile taşınamayıp santralde bulunan kazanın tabanına düşen “taban külü”,
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün su vasıtasıyla soğutulması ve uzaklaştırılması ile oluşan “ham kül”,
- Çok ince taneye sahip olup, termik santrallerdeki bacalara takılan elektro statik filtreler yardımıyla tutulması sağlanan “uçucu kül”.

Tüm dünyada, kömürle çalışan termik santraller elektrik üretimi için yılda 500 milyon tondan fazla uçucu kül açığa çıkartmaktadır. Açığa çıkan uçucu kül miktarının yalnızca %25 ile %30’u farklı sektörlerde yeniden kullanılmaktadır (Mathapadi vd. 2022). Türkiye’de halen kömürle çalışan çok sayıda termik santral faaliyet göstermektedir. Bunun sonucu olarak da yılda yaklaşık 16 milyon ton uçucu kül atık olarak ortaya çıkmaktadır, 2020’li yıllarda 55 milyon tona çıkması beklenmektedir. (Gültekin ve Kaplan 2010).

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar. F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi % 70’den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi % 10’un altında olduğu için düşük kireçli olarak da isimlendirilirler. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden elde edilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50’den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küllerde ise $\text{CaO} > \% 10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe ve bağlayıcı özelliğe sahiptirler (ASTM C618 2001). Uçucu külün kullanım alanları arasında, beton, endüstriyel seramik ve refrakterler, boyaların üretimi, katı atıkların stabilizasyonu ve bitki yetiştirilmesi de sayılabilmektedir.

2.13 Polipropilen Lif

Lifler doğal ve sentetik olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. Polipropilen lifler sentetik lif sınıfına girmektedir. Sentetik lifler daha rahat temin edilebilmeleri, korozyona karşı olan dirençleri, çekme mukavemetlerinin yüksekliği ve rijit bir yapıya sahip olmaları sebebiyle doğal liflere oranla daha yaygın bir kullanım alanı bulmaktadırlar. (Taha vd. 2020, Soğancı 2015).

Polipropilen lifler beton, sıva, şap, alçı, saha betonu gibi uygulamalar için kullanılan mikro donatı malzemesidir. Beton içerisindeki lif katkısı geçirimsizliği azaltmakta ve basınç ile eğilme mukavemetlerinin artmasını sağlamaktadır. Yapısı itibarıyla asit ve bazlardan etkilenmemektedir. Donatının korozyona uğramasını geciktirmektedir. Betonun dağılmasını ve parçalanmasını önlemesi sayesinde depremde oluşabilecek hasar ve çökme risklerini azaltmaktadır (Taha vd. 2020).

2.14 Alçı

Alçı taşının 163 °C'de ısıtılıp soğutulması sonrasında bünyesinde bulunan suyun tamamını kaybetmesi yoluyla kalsine alçı elde edilmektedir. Susuz kalsiyum sülfat olarak da adlandırılmaktadır. Islatılıp kurutulduğunda hızlı donan bir yapısı bulunmaktadır (Başpınar ve Aytekin 2019).

2.15 Köpük Ajansı

Köpük katkıları hava sürükleyici madde olarak da tanımlanır. Hava sürükleyici ajanlar organik malzemeleri içermektedir. Köpük maddeleri karışımda kullanılacak olan suya ilave edildiğinde çimento hamurunun içeriğinde birbirinden bağımsız olarak milyonlarca kabarcıklar oluşur. Köpüğün kalitesi köpük beton özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Yaygın olarak köpük ajanları iki kategoriye ayrılmaktadır:

Sentetik esaslı olanlar yüzey çekme gerilmelerini önlemektedir ve daha düşük birim hacim ağırlığa sahip beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. 400 kg/m³ ile

1600 kg/ m³ yoğunluklar için uygundur. Protein esaslı olanlar hayvan ve bitkilerdeki proteinin hidrolizi ile elde edilmekte olup stabil köpük kabarcıkları oluşumunu sağlamaktadır ve 1000 kg/m³ ve üstü yoğunlukları için uygundur (Brady vd. 2001).

- Köpük yüzey zarının etkin dayanımı yüzey yükünü taşımaya yeterlidir.
- Yüzey yükün artması durumunda bölünme yeteneğine sahiptir.
- Anti bakteriyeldir, betonda küflenmeye karşı etkilidir.
- Köpük yoğunluğu 40-120 g/dm³ olarak ayarlanabilmektedir.
- Beton içerisinde mikro gözenekler sayesinde iyi bir yalıtım sağlamaktadır.
- Beton karışım süresinin uzaması durumunda hacim kayıpları olmamaktadır.
- Bütün çimentolarda tiplerinde kullanılabilir, 32,5-42,5-52,5 (Kearsley ve Wainwrigh 2001).

2.16 Süper Akışkanlaştırıcı

Süperakışkanlaştırıcı kimyasallar genel olarak beton veya harç karışımlarında işlenebilme kabiliyetini, kıvam özelliklerini ve elde edilmek istenen mekanik özellikleri stabilize etmek için kullanılmaktadır. Genel olarak kullanılan süper akışkanlaştırıcılar olarak lignosülfonatlar, naftalen, melamin esaslı bileşikler ve modifiye polikarboksilatlar bulunmaktadır (Luukkonen vd. 2018).

2.17 Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Xu vd. (2024) yaptıkları çalışmada, süperhidrofobik liflerle güçlendirilmiş köpük betonun yapısal dayanımını önemli ölçüde artırabileceğini ortaya koymaktadırlar. Çalışmada kullandıkları kalsiyum stearat, polidimetilsiloksan ve hidroksipropil metil selüloz, betonun viskozitesini arttırmış ve kuruma sırasında büzülmeyi azaltmıştır. Yapılan FTIR ve SEM analizleri, liflerin homojen bir şekilde dağıldığını ve polidimetilsiloksanın çimento hidratasyon ürünleriyle etkileşime girdiğini göstermiştir. Farklı uzunluk ve dozajlarda liflerin kullanımı, betonun dayanıklılığını arttırmış olup özellikle 18 mm uzunluğunda ve % 0.6 dozajında lifler kullanıldığında, köpük betonun 3.4 MPa basınç dayanımına ulaştığı görülmüştür. Bu bulgular, lifle güçlendirilmiş süperhidrofobik köpük betonun, yapı malzemeleri alanında önemli iyileştirmeler

sağlayabileceğini ve inşaat sektöründe daha dayanıklı, sürdürülebilir malzeme çözümleri sunma potansiyelini göstermiştir.

Rodhia vd. (2024) yaptıkları çalışmada, köpük beton karışımlarında doğal kumun % 0, % 10, % 30, % 50, % 70 ve % 100 oranlarında inşaat ve yıkım atıklarından geri dönüştürülmüş ince agregâ ile değiştirilmesinin köpük beton özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Protein bazlı kullanılan köpük ajanı farklı su oranları kullanılarak seyreltilmiştir. Sonuçlara göre, ince geri dönüştürülmüş agregâ miktarının artırılmasıyla birlikte köpük betonun gözenekliliğinin ve su emme değerlerinin arttığı görülmüştür. Doğal kumun % 50'ye kadar oranda geri dönüştürülmüş ince agregâ ile yer değiştirilmesi önerilmiş ve yüksek oranda geri dönüştürülmüş agregâ kullanımının atıkların bertaraf edilmesinde önemli bir rol oynayacağını göstermiştir.

Feng vd. (2024) yaptıkları çalışmada liflerin ve gözenek yapısının köpük betonun ısı iletkenliği ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada, lif türü, uzunluğu, dozajı ve silis dumanı oranı gibi faktörler değerlendirilmiştir. Silis dumanı eklenmesi köpük betondaki işlenebilirliği azaltmış ancak karışıma eklenen polipropilen lif katkısı ile basınç dayanımlarında artış görülmüştür. Aynı porozite oranına sahip ancak farklı gözenek boyutu dağılımına sahip köpük betonlar, gözenekler kapalı olduğunda benzer ısı iletkenlik göstermişlerdir. Gözeneklerin homojen şekilde dağılması basınç dayanımı artışlarında olumlu katkı sağlamaktadır. Isı iletkenlikler incelendiğinde, daha büyük gözenek çaplarına sahip numunelerde daha belirgin bir fark gözlemlenmiştir; bu durum, gözenek çapı ve dağılımlarının ısı transferi sırasında ısı iletkenlikte önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Lv vd. (2024) yaptıkları çalışmada, hafif köpük betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılığını artırmak amacıyla yenilikçi bir yüksek modüllü hidrofobik köpük tasarlamışlardır. Polimetil hidrojen siloksan kullanılarak, hidroksipropil metilselüloz köpüğü hidrofobik bir yapı oluşturmak için kullanılmıştır. Elde edilen köpük baloncukları yüksek modül, küçük çap ve stabilite sergilemektedir. 8 µm kalınlığındaki köpük duvarı, inorganik ve organik parçacıkların reaksiyonunu kolaylaştırarak elde edilmek istenen hidrofobik özellikleri artırmaktadır. Sonuç olarak bu köpük beton düşük

su adsorpsiyonu ve yüksek mekanik dayanım göstermekte, normal betona kıyasla kimyasal direnci daha yüksek ve klorür difüzyonuna karşı daha fazla direnç sunmaktadır.

Shi vd. (2024) mekanik özellikleri geliştirmek için lateks tozu ve polipropilen lif kullanılmıştır. Lateks tozu ve polipropilen lifin, köpük betonun basınç ve çekme özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlara göre lateks tozu ve polipropilen lif kombinasyonunun, sıradan köpük betona göre enerji emme kapasitesini %13,4, plastiklik indeksini %5024,6 ve çekme ile basınç dayanımı oranını %190,7 artırdığını göstermiştir. Lateks tozunun hidrasyonu ile oluşan biyomembran, köpük beton içerisinde oluşan gözenek yapısını iyileştirerek, polipropilen lif kullanımıyla birlikte oluşan çatlakların büyümesini ve plastisitesini optimize etmektedir. Bu da köpük betonun mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

Song vd. (2024) yaptıkları çalışmada kömür gangi içeriği kullanılarak, su/bağlayıcı oranı ve köpük içeriğinin mekanik, ısı yalıtım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre köpük içeriğinin betonun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğu, su/bağlayıcı oranının ise ısı iletkenlik ve su emme değerleri için belirleyici bir önemde olduğunu göstermektedir.

Zhang vd. (2024) yaptığı çalışmada hafif beton kullanarak yüksek performanslı yalıtım duvarlarının sismik davranışını araştırmışlardır. Prefabrike köpük beton kompozit duvarlar, ısı iletkenliğinin düşük olması ve yüksek mukavemet sağlayarak düşük enerji tüketimiyle kaliteli hava ve ısı elde edilmek istenen pasif evler için uygun özellikler taşımaktadır. Araştırma, yarı statik testler ve dış hasar gözlemleri ile prefabrike köpük beton kompozit duvarların sismik davranışını analiz etmiştir. Köpük betonun hafif ve gözenekli yapısı çatlak oluşumlarına sebep olurken, magnezyum hasır levhalar ve poliüretanlar oluşan çatlak gelişimini engelleyerek köpük betonun yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Pasif evlerdeki pencere açıklıkları sismik davranışı zayıflatmakta, ancak yerinde döküm duvarın bütünlüğü yük taşıma ve deformasyon kapasitelerini artırmaktadır.

Liu vd. (2024) yaptıkları çalışmada köpük betonun makroskopik mekanik davranışının mezoskopik gözenek yapısını nasıl etkilediğini incelemektedir. Makroskopik mekanik özellikleri belirlemek için tek eksenli basınç testleri yapılmış, yük altında köpük betonun çok boyutlu hasar oluşumları SEM karakterizasyonu ile gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar köpük betonun tek eksenli yük altındaki gerilimi ile olması gereken sınırlı gerilim arasında önemli bir lineer ilişki olduğunu göstermektedir. Tek eksenli basınç deneyi sırasında, gerilme ve kayma hasarları, köpük betonun akma noktasının her iki tarafında olmuştur. Köpük betonun gözenek oranında artış gözlemlenmiş olup köpük betonda oluşan gerilme hasarının belirgin hale gelmesine neden olmaktadır.

Mydin vd. (2024)'e yaptıkları çalışmada, üç farklı yoğunluktaki (500 kg/m^3 , 1000 kg/m^3 , 1500 kg/m^3) köpük beton ve 1980 kg/m^3 yoğunluğundaki harcın yüksek sıcaklıkların özelliklerine etkilerini incelemektedir. Yüksek sıcaklıklara (100°C , 150°C , 200°C , 400°C , 600°C ve 800°C) maruz kalmanın ardından elastisite modülü, mukavemetler, termal iletkenlik ve kütle kayıpları araştırılmıştır. Sonuçlara göre düşük yoğunluktaki köpük betonun çatlama eğilimi gösterdiği, yüksek yoğunluktaki köpük betonların ise gözenek stabilitesini daha iyi koruyabildiğini ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklıklar, harç üzerinde daha az etki göstermiştir. Tüm örneklerde dayanımlar ve termal iletkenlik azalırken, ultrases geçiş hızı değerleri önce artmış, sonra düşmüştür.

Ding vd. (2024) yaptıkları çalışmada, A07 yoğunluğunda ve $0.147 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ termal iletkenliğe sahip prefabrik hafif kendinden yalıtımlı köpük beton duvar panelleri üretilmiştir. Prefabrik hafif kendinden yalıtımlı köpük beton panellerin mekanik özellikleri, dayanıklılığı, eğilme dayanımı, darbe direnci ve askı kuvveti performansı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre panellerin gelişmiş mekanik özellikler sergilediği ve kendi ağırlıklarının 2.5 katı kadar yük taşıyabildiğini göstermiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Hammaddeler

Çalışmada kullanılan hammaddeler ve özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

3.1.1 Çimento

Üretimde bağlayıcı olarak Afyonkarahisar Çimsa çimento fabrikasında üretilen TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Çalışmada CEM I 42.5 R çimentosunun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Kimyasal Bileşim, %	CEM I 42.5 R
Kimyasal Özellikler (XRF analizi)	SiO ₂	19.10
	Al ₂ O ₃	4.84
	Fe ₂ O ₃	2.92
	CaO	63.56
	MgO	1.38
	Na ₂ O	0.20
	K ₂ O	0.92
	SO ₃	3.15
	Klorür	0.0096
	Kızdırma kaybı	3.45
	Çözünmeyen Kalıntı	0.33
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk, gr/cm ³	3.09
	Özgül yüzey, cm ² /gr	3984
	Priz Başlama Süresi, dk	152
	Kıvam Suyu, %	26
	Elek Bakiyesi 45µ, %	1.6
Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı, MPa (2 Günlük)	36.0
	Basınç Dayanımı, MPa (7 Günlük)	44.9
	Basınç Dayanımı, MPa (28 Günlük)	54.3

3.1.2 Köpük

Çalışma kapsamında Knopp Contopp Foam Builder SFS3 sentetik esaslı köpük ajanı kullanılmıştır. Köpük üretim makinesinde sentetik bazlı köpük ajanı kullanılarak üretilen köpük, düşük çapta gözeneklere sahip ve 70 gr/L birim ağırlık değerlerinde üretilmiştir. Kullanılacak köpüğün küçük çaplı gözenekli, homojen dağılımlı olması ve üretildikten sonra belli bir süre stabil kalabilmesi (sönmemesi) önem taşımaktadır. Kullanılan köpükte aranan diğer bir özellik ise köpüğün litre ağırlığıdır. Buna göre karışıma katılacak köpüğün 70- 90 gr/L ağırlıkta olması uygun olmaktadır.

3.1.3 Uçucu Kül

Bu çalışmada puzolanik katkı olarak özel bir firmadan tedarik edilen Seyitömer uçucu külü kullanılmıştır (Resim 3.1). Uçucu külün kimyasal yapısındaki SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bileşenlerin oranları uçucu kül türüne göre farklılık arz etmektedir. Ayrıca MgO , SO_3 , alkali oksitler de az bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu külde bulunan başlıca bileşikler Çizelge 3.2’de sunulmuştur. Bu bileşiklerin % miktarları uçucu külün sınıfını belirlemektedir.



Resim 3.1 Seyitömer uçucu külü.

Seyitömer uçucu külünün kimyasal bileşiminde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamı %88.24 olup CaO oranı ise %2.10 olması sebebiyle F sınıfı uçucu kül grubuna girmektedir (ASTM C 618 2001).

Çizelge 3.2 Uçucu külün kimyasal yapısı.

Bileşik	% Miktar
SiO_2	56.02
Al_2O_3	22.35
Fe_2O_3	9.87
CaO	2.10
MgO	3.76
Na_2O	0.19
P_2O_5	0.26
K_2O	2.09
TiO_2	1.03
MnO	0.14
SO_3	0.57
NiO	0.23
Cr_2O_3	0.17
A.Z. (LOI)	1.01

3.1.4 Su

Harç bileşenlerinin karışımı ve hidratasyon için kullanılan su, nitelik olarak içilebilir niteliğe sahip şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada Sika Viscocrete 5556 Hi-Tech süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu akışkanlaştırıcı karışımın su ihtiyacını azaltmak için yüksek oranda su azaltıcı özelliği, dona karşı dayanım kazandırması, klorür içermemesi, betonla temas eden donatıya zarar vermemesi, karbonatlaşma hızını düşürmesi gibi sebeplerle tercih edilmiştir. Teknik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir (İnt. 1).

Çizelge 3.3 Sika Viscocrete 5556 Hi-Tech teknik özellikler.

Özellik	Test Metodu	Sonuçlar
Homojenlik	Görsel	Homojen
Renk	Görsel	Kahverengi Likit
Yoğunluk 20 °C, g/cm ³	ISO 758	1.0432
Katı Madde Yüzdesi, %	EN 480-8	18.10
pH, (%10'luk Çözelti)	ISO 4316	4.30
Suda Çözünebilen Klor Yüzdesi, %	EN 480-10	0.0797
Alkali Yüzdesi, %	EN 480-12	0.22
Korozyon Davranışı	EN 480-14	Korozyona etkisi yoktur

3.1.6 Polipropilen Lif

Bu çalışmada 12 mm uzunluğunda ve 32 µm çapında polipropilen lif kullanılmıştır. Üretilen uçucu kül katkılı köpük beton numunelerde rötre değerlerini azaltması ve eğilmede çekme dayanımlarına katkı yapması beklendiği için kullanılmıştır. Resim 3.2’de görülmekte olan lif hidrofobik özelliğe sahip beyaz renklidir.

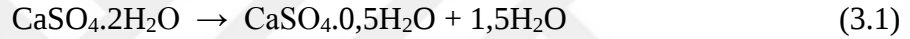


Resim 3.2 Polipropilen Lif

3.1.7 Alçı

Çalışmada harç içeriğinde bulunan köpüğün kararlılığını kaybetmeden priz almaya başlaması ve rötire çatlakları oluşumunun önüne geçilebilmesi amacıyla alçı kullanılmıştır. Alçı karışımlarda kontrol serisinde bulunan çimentonun %1'i oranında kullanılmıştır. Fazla kullanımı halinde betondan beklenen mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini olumsuz etkilemesi beklendiğinden sınırlı bir kullanım yapılmıştır.

Alçı, doğal kalsiyum sülfat iki hidrat olan jipsin 160–200 °C sıcaklıkları arasında kalsine edilmesiyle oluşur. Bu kalsinasyon süresinde içeriğindeki mevcut suyun %75'ini kaybeder ve yarı hidrat kalsiyum sülfat haline gelir (Karahana ve Erşahin 2016) bu reaksiyon (3.1)'de gösterilmiştir.



Kalsinasyon sonucu elde edilen hammadde, öğütölme işlemi sonrasında gerekli katkı malzemeleri ilave edilerek piyasada bulunan farklı türde ürünler elde edilmiş olur. Suyu karıştırılan alçı akışkanlaşır ve kısa sürede priz alır. Alçının priz reaksiyonu ise aşağıdaki formüldeki (3.2) gibi gerçekleşir.



3.2 Deney Örneklerinin Hazırlanması

Mutlak hacim yöntemine göre beton karışım hesabı yapılmış ve kullanılacak malzeme oranlarına karar verilmiş ve üretimlere başlanmıştır. Nihai tasarımda birim ağırlık, su/bağlayıcı oranı, akışkanlaştırıcı oranı, lif miktarı, köpük yoğunluğu gibi değerler net olarak optimize edilmiştir. Köpük betondaki çalışmadan karşılaştırmalı sonuçlar alabilmek amacıyla 2 farklı birim ağırlıkta ve toplam 8 farklı karışım oranında deney serileri hazırlanmıştır (Çizelge 3.4). Örneğin 800UK10 serisi, üretilen köpük betonların 800 kg/m³ olduğunu ve çimento yerine %10 oranında uçucu kül kullanıldığını göstermektedir.

Çizelge 3.4 Köpük beton karışım oranları.

Seri Adı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çimento (kg)	UK (kg)	Alçı (kg)	AK (kg)	Lif (kg)	KY (gr/L)	Köpük Ağ. (kg)	S/B
800UK0	800	600	0	6	1.94	0.48	70	39.31	0.40
800UK5		570	30	6	2.12	0.48	70	39.08	0.40
800UK10		540	60	6	2.30	0.48	70	38.85	0.40
800UK15		510	90	6	2.36	0.48	70	38.62	0.40
1000UK0	1000	750	0	6	1.95	0.48	70	31.48	0.40
1000UK5		712.5	37.5	6	2.65	0.48	70	31.45	0.40
1000UK10		675	75	6	2.87	0.48	70	31.16	0.40
1000UK15		637.5	112.5	6	2.95	0.48	70	30.87	0.40

Kısaltmalar: UK: Uçucu Kül, AK: Akışkanlaştırıcı Katkı, KY: Köpük Yoğunluğu, S/B: Su/ Bağlayıcı

3.2.1 Üretim Aşaması

Karışım dizaynında kullanılacak olan numuneler tartılarak mikserde konmuş ve öncelikle mikserde homojen hale gelinceye kadar karıştırılmıştır (Resim 3.3). Karışım için öncelikle karışım suyu hazırlanarak içerisine akışkanlaştırıcı katkı ve lif eklenmiştir. Mikser içerisindeki su hazır hale geldikten sonra çimento eklenmiş ve mikser çalıştırılmıştır. Homojen hale gelen karışıma sırasıyla uçucu kül ve alçı ilavesi yapılarak karışım homojen hale gelene kadar karıştırılmış ve en son köpük ilavesi yapılmıştır. Karışımın tamamı homojen hale getirilmiş ve taze birim ağırlık deneylerine başlanmıştır.



Resim 3.3 Hazırlanan harçtan mikserde homojen karışımın elde edilmesi.

Karışım homojen hale gelinceye kadar karıştırıldıktan sonra köpük üretimi için köpük üretim jeneratöründen köpük elde edilmiştir (Resim 3.4).



Resim 3.4 Karışıma ilave edilecek köpüğün üretimi.

Elde edilen köpüğün istenen birim ağırlıkta olduğunun tespiti için terazide tartılmış ve köpüğün birim ağırlığı tespit edilmiştir. Köpük ağırlığının ölçümü için 16 lt hacimli kap kullanılmıştır (Resim 3.5).



Resim 3.5 Karışıma ilave edilecek köpüğün birim ağırlık ölçümü.

İstenen birim ağırlığa sahip köpük elde edildikten sonra tasarımda belirlenen miktar kadar köpük tartılarak mikserde bulunan taze harcın içerisine dökülmüş ve mikserde karıştırma işlemine devam edilmiştir.

İstenen değerlere sahip harç elde edildikten sonra test ve analizler için gerekli kalıplara numune dökümleri gerçekleştirilmiştir. Küp numune deneyleri için 100x100x100 mm kalıplara numune dökümleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.6).



Resim 3.6 Homojen harcın kp kalıplara yerleştirilmesi.

Zamana bağlı yüzey sıcaklığı geçiş simülasyonu ve akustik özellik simülasyon deneyleri için 300x300x50 mm boyutlarında kare kesitli olarak hazırlanan kalıplara numune dökümleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.7).



Resim 3.7 Homojen harcın plaka kalıplara yerleştirilmesi.

Kuruma küçülmesi değerlerinin bulunabilmesi için 40x40x160 mm kalıplara harç yerleştirilmiş ve kalıptan çıkarma işlemi için 24 saat prizini alması beklenmiştir (Resim 3.8).



Resim 3.8 Homojen harcın plaka kalıplara yerleştirilmesi.

Duvar panelleri üretimi için TSE K 600 ve TS 13655'e göre duvar panel kalınlığı hem iç hem de dış duvara uygulanmasına uygun olacak şekilde hazırlanan 800x340x100 mm boyutlarında hazırlanan ve içerisine 6 mm çapa sahip hasır donatı yerleştirilen Resim 3.9'daki prizma kalıplara eğilme deneyi için harç yerleştirme işlemi yapılmıştır. Donatılar fabrikasyon üretim olup, donatılar arası mesafe 15 cm'dir.



Resim 3.9 Duvar panel kalıpları (800x340x100 mm).

Panel kalıbına yerleştirilen karışım harcı prizini alması için kurumaya bırakılmıştır (Resim 3.10).



Resim 3.10 Harç yerleştirilmiş duvar panel kalıbı.

Numune üretimleri bu aşamada bitirilmiş olup numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak mukavemet kazanmaları amacıyla buhar kabinine yerleştirilmiştir. Üretilen köpük beton deney örneklerinin düşük yoğunluklarda yeterli basınç mukavemeti kazanması buhar kürü uygulaması ile elde edilmektedir. Buhar kürü uygulaması sıcaklığın kademeli artırılması ile 80 °C sıcaklıkta ve ortalama 8 saat sürede gerçekleşmiştir (Resim 3.11).



Resim 3.11 Numunelerin buhar kürüne tabi tutulması işlemi.

Buhar k r nden 8 saat sonra çıkarılan numuneler birim ağırlık ve diğ r testlerin yapılabilmesi amacıyla etüvde sabit kütleye gelene kadar 60  C’ de kurutulma işlemine tabi tutulmuştur (Resim 3.12).



Resim 3.12 Numunelerin etüv kuru hale getirilmesi.

3.3 Test ve Analizler

3.3.1 Taze Beton  zellikleri

3.3.1.1 Taze Birim Ağırlık Deneyi

Hazırlanan köpük, mikser içerisinde karışım homojen hale geldikten sonra mevcut karışımın istenen birim ağırlıkta elde edildiğini değerlendirebilmek amacıyla 1 L  l ekli sabit kaba doldurularak tartımı yapılmıştır (Resim 3.13).



Resim 3.13 Homojen harcın ölçüm kabına doldurulması ve tartım yapılması.

3.3.1.2 Kıvam Analizi

Köpük betonların akışkanlığını belirlemede yaygın olarak kullanılan yöntem Marsh Konisi (Resim 3.14) yöntemidir (Roussel vd. 2005). Bu yöntem temel olarak 1.5 litrelik hacme sahip huniye homojen hale getirilmiş kalıba döküme hazır harcın huniye doldurulması ve sonrasında 1 litrelik harç kısmının akma süresinin ölçülerek not edilmesi esasına dayanmaktadır. Akış süresinin kayıt altına alınmasının yanı sıra akma davranışı da görsel olarak belirlenerek not edilmiştir. Bu teste göre 1 litrelik taze harcın 1 dakikalık bir sürenin altında akıyor olması sabit ve düzenli akış olarak değerlendirilmektedir. Akış süreleri 1 dakikayı geçen harçlar içinse engelli veya zor akış olarak ifade edilmektedir. Harç akmıyorsa “akmadı” olarak not edilmektedir (Mohammad 2011). Çalışmada yapılan ölçümler Marsh konisi ile yapılmış ve değerlendirilmiştir.



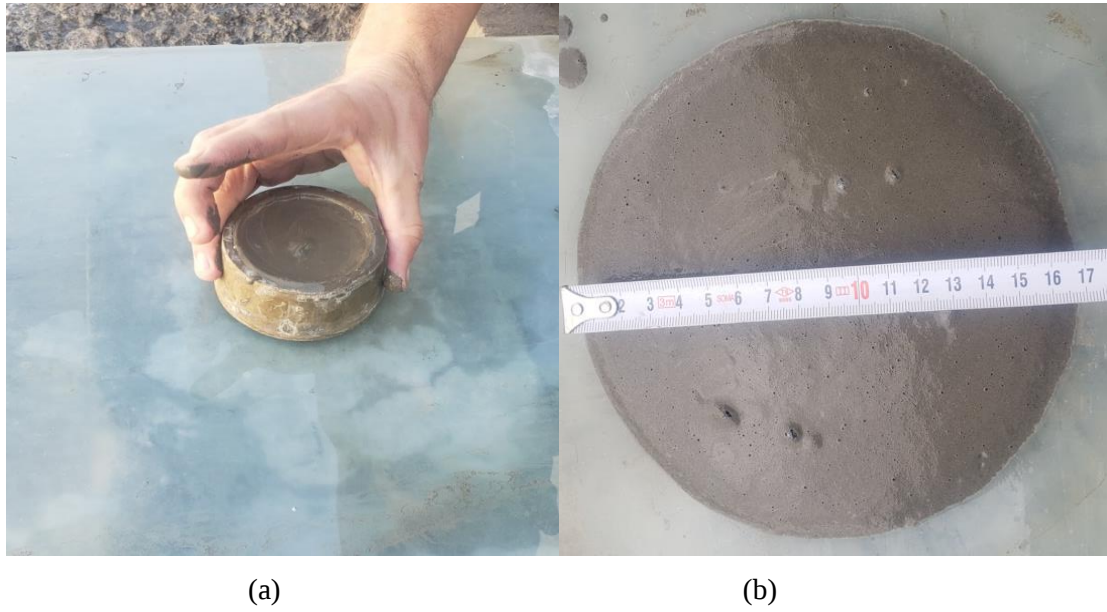
Resim 3.14 Marsh konisi ile kıvam analizi.

3.3.1.3 Yayılma Tablası Deneyi

Karışım dizaynlarındaki farklılıkların taze harç kıvamına olan etkisi, yayılma tablası yardımıyla belirlenmiştir. Yayılma tablası deneyi paslanmaz çelik veya pirinçten, 60

mm yükseklikte, taban iç çapı 100 mm ve üst iç çapı 70 mm olan kesik koni şekilli kalıp ile içine taze harç doldurmak ve huninin kaldırılması üzerine harcın tabla üzerinde yayılmasının ölçümü ile yapılan bir test yöntemidir. Huni yayılma tablasının yüzeyine ortalanarak yerleştirilmiştir. Yayılan harç kütlesi birbirine dik iki farklı doğrultuda mm cinsinden ölçülüp ve ortalaması alınmıştır.

Buradan elde edilen değer kıvam analizinde karşılaştırma için kullanılmıştır (Resim 3.15).



Resim 3.15 Yayılma tablası (a), yayılma tablası ile kıvam analizi (b).

3.3.2 Fiziksel Özellikler

3.3.2.1 Kuru Birim Ağırlık

Köpük beton küp numuneler sabit ağırlığa gelene kadar 60 °C sabit sıcaklıkta etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Sonrasında 0.1 g hassasiyete sahip terazi kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Elde edilen değerler numune hacimlerine bölünerek denklem (3.3) ile TS EN 772-13 standardına göre kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır.

Ölçüm işlemi yapılan numuneler terazi üzerine konup her bir numune için ayrı ayrı etüv kurusu ağırlıkları kayıt altına alınmıştır (Resim 3.16).



Resim 3.16 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerin etüv kurusu ağırlık tartım işlemi.

$$D_h = \frac{M_k}{V_h} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.3)$$

D_h: Birim hacim ağırlık (kg/m³),

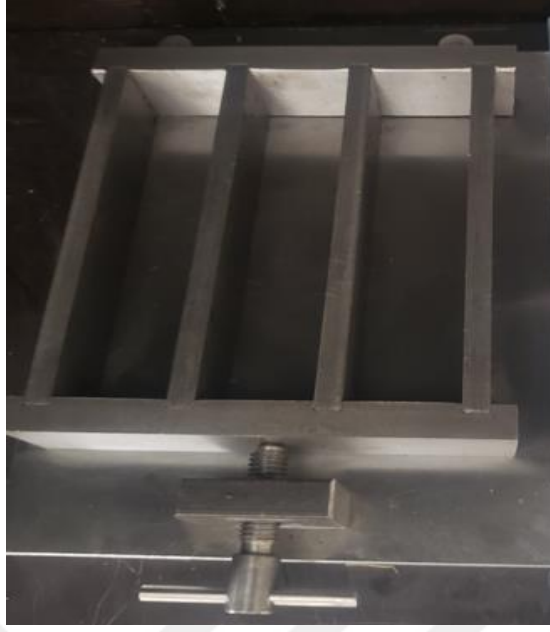
M_k: Etüv kurusu ağırlık (kg),

V_h: Numunenin boşluklar dahil hacmi (dm³).

3.3.2.2 Rölatif Uzunluk Değişimi

Numunelerin rölatif uzunluk değişimi deneyleri için prizmatik 40x40x160 mm numuneler Resim 3.17’ deki kalıplara dökülmüştür ve 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp 8 saat 80 °C buhar kürüne tabi tutulduktan sonra aşağıdaki formül yardımıyla ile % 40, % 30, % 20, % 10 ve % 6 nem oranlarındayken Resim 3.18’de görünen numunelerin uzunlukları kayıt altına alınmıştır. Numuneler üzerinde rölatif uzunluk değişimi deneyi TS EN 680’e göre yapılmıştır.

Numuneler üzerinde rölatif uzunluk değişimi deneyi TS EN 680’e göre yapılmıştır.



Resim 3.17 Rölatif uzunluk değişimi için kullanılan kalıplar.



Resim 3.18 Rölatif uzunluk değişimi için üretilen numuneler.

Nem içeriği aşağıdaki denklem (3.4) yardımıyla hesap edilmiştir.

$$\mu_{mi} = \frac{m_i - m_d}{m_d - m_{pim}} \times 100 \quad (3.4)$$

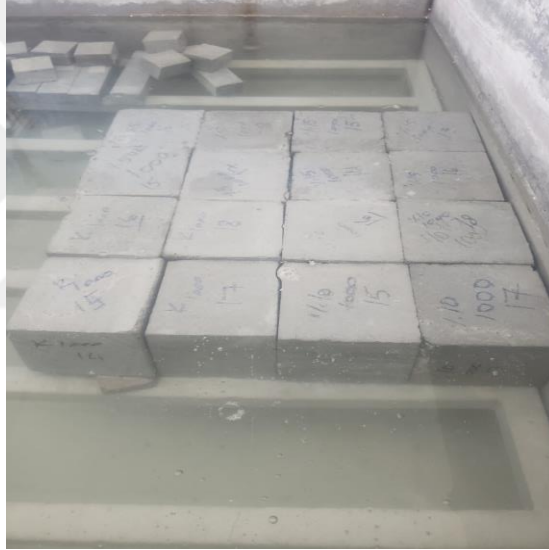
μ_{mi} : Nem içeriği (%),

m_i : Deney numunesinin i ölçüm tarihindeki yaş kütlesi (kg),

md: Deney numunesinin (105±5) °C’ de kurutulduktan sonraki kütlesi (kg),
m_{pim}: Ölçü pimlerinin kütlesi (yapıştırıcı dahil) (kg).

3.3.2.3 Su Emme Oranının Belirlenmesi

Su emme testi için üretilen köpük beton deney örnekleri 100x100x100 mm ebatlarında üretilmiştir. Test öncesinde üretilen köpük beton numuneler etüvde değişmez ağırlığa gelene kadar 60 °C’de kurutulmuş ve sonrasında soğumaya bırakılmışlardır. Etüv ağırlıkları kaydedilen numuneler daha sonrasında 48 saat suda bekletilmek suretiyle suya doymun hale getirilmişler (Resim 3.19) ve denklem (3.5) yardımıyla su emme değerleri belirlenmiştir.



Resim 3.19 Kür havuzundaki köpük beton numuneleri.

$$\% Sa = \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \times 100 \quad (3.5)$$

Sa: Ağırlıkça yüzde su emme (%),

P₁: Etüv kurusu ağırlık (kg),

P₂: Suya doymun yüzey kuru ağırlık (kg).

3.3.2.4 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Ultrases geçiş hızı deneyinde, numuneye iletilen ses dalgalarının bir tarafından diğer bir tarafına geçiş süresi ölçülerek, dalga hızı hesaplanmaktadır. Ultrases cihazı, ses üstü dalgaların, probalar arasında kalan mesafeden ne kadar sürede geçtiğini mikro saniye biriminde belirtir. Sesin geçiş hızı köpük betonun yoğunluğuna, gözenekliliğine ve çatlak yapısına bağlı olarak değişmektedir.

Ultrases geçiş hızı deneyi yapılırken ölçümü gerçekleştirecek problemlerin karşılıklı gelmesine dikkat edilerek, problemlerin temas edeceği yüzeyler özel bir jel kullanılarak yüzey hazır hale getirilmiş ve ölçüm yapılmıştır (Resim 3.20).



Resim 3.20 Numunelerin ultrases geçiş hızı ölçümlerinin yapılması.

Aşağıdaki denklem (3.6) yardımıyla ultrases geçiş hızı hesap edilmektedir.

$$V = \frac{M}{t} \quad (3.6)$$

V= Ultrases geçiş hızı (km/s),

M = Problemler arası mesafe (km),

t = Zaman (s).

3.3.2.5 Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi uygulanacak numuneler deney öncesinde 24 saat süreyle etüvde tutularak etüv kurusu hale getirilmiş ve sonrasında numunelerin suyla temas edecek yan yüzeyleri 1 cm yüksekliğinde parafinle kaplanarak yalnızca tabandan su emmeleri sağlanmıştır (Resim 3.21).

Su emme başladıktan sonra 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64'üncü dakikalarda ağırlıkları ölçülerek kayıt altına alınmıştır.



Resim 3.21 Numunelerin kılcal su emme deneyi ölçümlerinin yapılması.

Numunelerin belirtilen dakikalardaki emdikleri su miktarının bulunması için denklem (3.7) yararlanılarak kılcal su emme değerleri belirlenmiştir.

$$S = \frac{Q}{A} / \sqrt{t} \quad (3.7)$$

S: Kılcallık ($\text{cm/s}^{1/2}$),

Q: Emilen suyun hacmi (cm^3),

A: Su ile temas eden yüzey alanı (cm^2),

t: Süre (dk).

3.3.3 Mekanik Özellikler

3.3.3.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Üretilen köpük beton numunelerin basınç dayanımı tayini için 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Köpük beton numunelerin basınç dayanımı değerlerinin ölçümü için alt ve üst tabla yatay açıklığı 230 mm, alt- üst yükleme plakaları arasındaki maksimum dikey açıklığı 165 mm olan, 200 kN basınç kapasitesine sahip dijital kontrollü beton basınç presi kullanılmış ve numunelerin dayanım testleri gerçekleştirilmiştir (Resim 3.22). Numuneler ölçüm cihazının tablaları arasında tam ortalanacak şekilde yerleştirilmiştir. Gerilme yükü artışı 0,5 MPa/sn olacak şekilde üniform bir yayılımla ve sürekli, darbesiz şekilde gerçekleştirilmiştir. Numune kırılıp dayanım düşmeye başlayıncaya kadar yük uygulanmaya devam etmiştir. Daha sonra her bir numune için basınç dayanımları ayrı ayrı tespit edilmiştir.



Resim 3.22 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numunelerin basınç dayanım testi.

Üretilen numuneler 8 saat buhar kürüne tabi tutulduktan sonra nemli kalmaları sağlanarak 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerine ulaştıklarında basınç dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir.

Denklem (3.7) ile hesaplamaları yapılmıştır.

$$f_b = P_k / A_0 \quad (3.7)$$

f_b : Basınç dayanımı (MPa)

P_k : Kırılma anındaki yük (N)

A_0 : Yüzey alanı (mm²)

3.3.3.2 Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilme dayanımı bir malzemenin eğilmeye karşı mukavemetini tespit etmek için kullanılır. Eğilme dayanımı testleri için 40x40x160 mm donatısız prizma numuneler, üretilmiştir. Köpük beton 40x40x160 mm donatısız prizma numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerinin ölçümü için laboratuvarımızda bulunan alt mesnetler arası maksimum açıklığı 100 mm, piston hareket mesafesi 100 mm ve eğilme dayanımı ölçüm kapasitesi 20 kN olan dijital kontrollü eğilme deney presi kullanılmıştır. Köpük beton duvar paneli örneklerinin eğilme dayanımı testleri için eğilme deney düzeneğine sahip pres kullanılmıştır. Alt mesnetler arası açıklık eğilme dayanım testine tabi tutulacak numunenin uzunluğuna göre hesap edilerek (100 mm) numune yerleştirilmiştir. Eğilme deneyleri için 3 noktalı ve 4 noktalı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır, örnekler için TS EN 196-1 standardına göre 3 nokta eğilme deneyi yapılmıştır (Resim 3.23).



Resim 3.23 40x40x160 mm numuneler için eğilme dayanımı testi uygulanması.

Donatılı duvar paneli numuneleri için 800x340x100 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Boyutları 800x340x100 mm donatılı duvar panellerinin testleri için alt mesnetler arası maksimum açıklığı 600 mm, piston hareket mesafesi 100 mm ve eğilme dayanımı ölçüm kapasitesi 200 kN olan dijital kontrollü beton presi kullanılmış ve numunelerin dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Donatılı olarak üretilen panel numuneler 3 nokta eğilme dayanımı deneyi sırasındaki çatlak oluşumları ve kırılan numunelerin resimleri Resim 3.24’de verilmiştir.



Resim 3.24 800x340x100 mm donatılı numuneler için eğilme dayanımı testi uygulanması.

Teste tabi tutulan numunelerin hesaplamaları denklem (3.8) ile yapılmıştır.

$$\sigma = 3PL/(2bh^2) \quad (3.8)$$

σ : Eğilme dayanımı (MPa)
P: Kırılma yükü (N)
L: Mesnetler arası mesafe (mm)
b: Numunenin genişliği (mm)
h: Numunenin yüksekliği (mm)

3.3.4 Fonksiyonel Özellikleri

3.3.4.1 Zamana Bağlı Yüzey Sıcaklığı Geçiş Simülasyon Deneyi

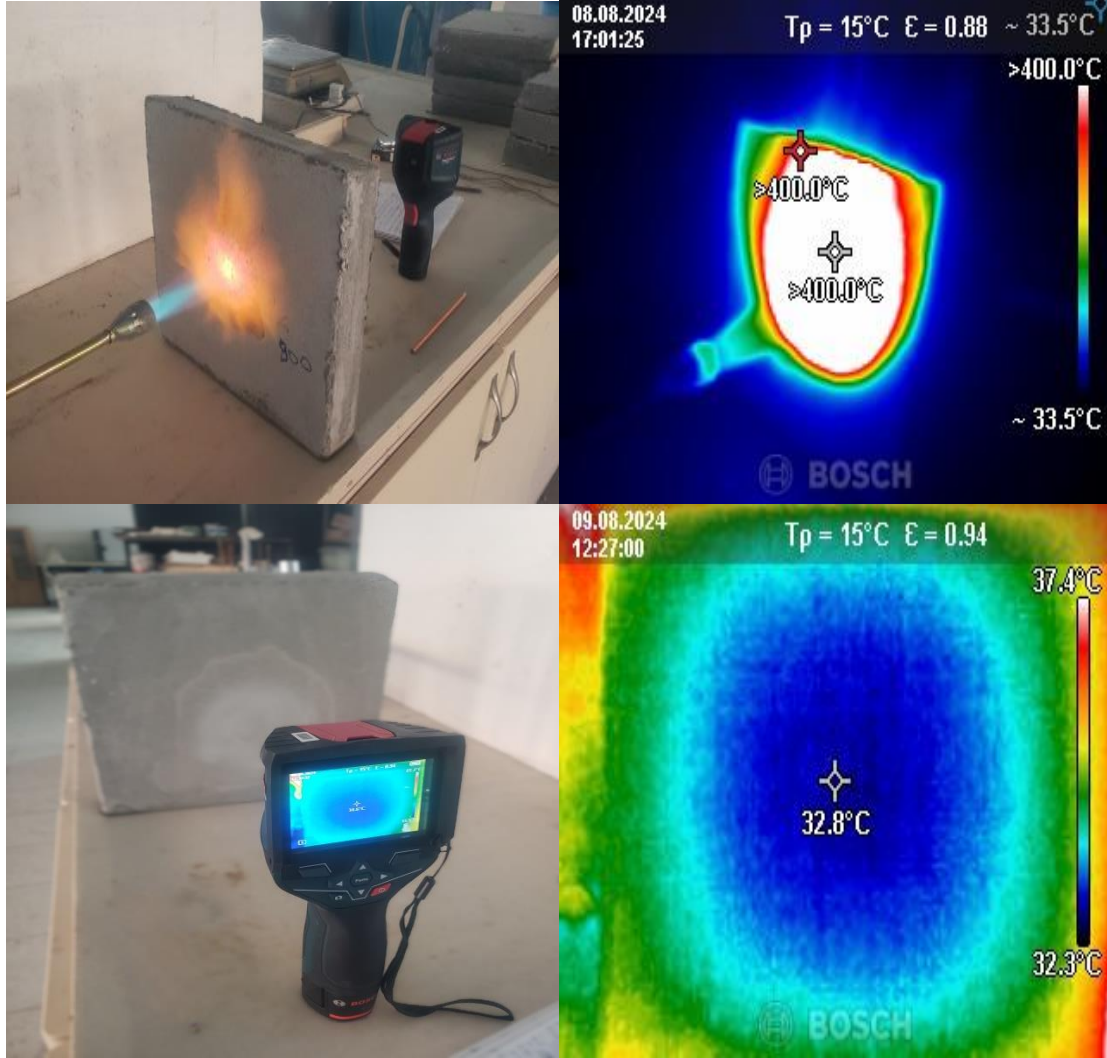
Zamana bağlı yüzey geçiş sıcaklığı simülasyon deneyi için 300x300x50 mm plaka numuneler üretilmiştir (Resim 3.25).



Resim 3.25 Zamana bağlı yüzey geçiş sıcaklığı simülasyon testi için üretilen 300x300x50 mm plaka numuneler.

Zamana bağlı yüzey geçiş sıcaklığı simülasyon deneyinin yapılabilmesi için numuneler etüvde 60°C’ de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulan numuneler sıcaklık verilmeden önce termal kamera ile yüzey sıcaklık ölçümleri yapıp kayıt altına alınmış, sonrasında pütmüz ile 400 °C üzerinde sıcaklığa maruz bırakılmışlar ve termal kamera ile 5 dakikalık süre ile sıcaklık verilmesi sonunda yüzey sıcaklık ölçümleri tekrar yapılmıştır.

Pürmüz ile numune yüzeyine sıcaklık verilmesi esnasındaki resimler ve termal kamera ile alınan anlık ekran görüntüleri Resim 3.26’da verilmiştir.



Resim 3.26 Pürmüz ile zamana bağlı yüzey sıcaklığı geçiş simülasyon deneyi.

Numunelerin sıcaklık değişimleri ölçümleri Bosch GTC 400 C modeli termal kamerayla yapılmıştır.

3.3.4.2 Akustik Özellik Simülasyon Deneyi

Akustik özelliklerin ölçümü için 300x300x50 mm plaka numuneler üretilmiş ve havada yayılan sesin ölçümü için 729 Hz olan ses dalgaları kullanılmıştır. Ses şiddeti ölçümü için 300x300x50 mm plaka numunelerden ses kutusu yapılmış ve kutunun bir yüzü açık

halde ses kaynağının ses şiddeti ölçümü yapılmış, sonrasında ise açık olan yüz plaka ile kapatılarak tekrar ses şiddeti ölçümü desibel olarak yapılmıştır (Resim 3.27, Resim 3.28). Ölçümler arasındaki ses şiddeti farkı % olarak verilmiştir.



Resim 3.27 Ses kutusu ile akustik özellik simülasyon deneyi.



Resim 3.28 Kutu kapalı haldeyken akustik özellik simülasyon deneyi.

Ses yutma katsayısı yansıtılan ve yutulan ses enerjisi arasındaki ilişkiyi tanımlar. 0 değeri toplam ses yansımaya ve 1 değeri toplam ses yutuma tekabül etmektedir. α_w 0,60 ise bu %60 ses yutması ve %40 ses yansımaya anlamına gelir. Ses yutma katsayısı (α_p) EN ISO 11654 standardına göre ölçülür.

3.3.5 Durabilite Özellikleri

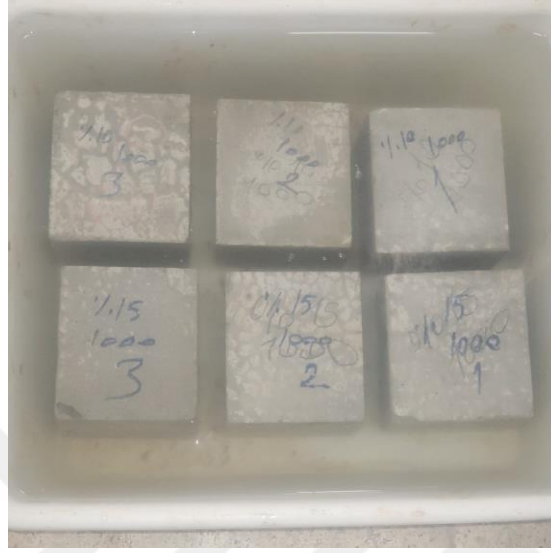
3.3.5.1 Donma Çözülme Deneyi

Donma çözülme deneyi için 100x100x100 mm numuneler kullanılmıştır. Numuneler donma çözölmeye maruz bırakılmadan önce etüv ağırlıkları kaydedilmiş, numuneler suya doygun hale getirildikten sonra donma çözölmeye çevrimlerine başlanmış ve donma çözölmeye deneyi sonrası tekrar etüv kurusu hale getirilerek kütle kayıpları, ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları ölçölmüştür. Zhang vd. (2024)'de yaptığı çalışmada 24 saat -23°C ' de dondurucuda, 23 saat süresince ise $+20^{\circ}\text{C}$ 'de %100 bağıl nemde kür olacak şekilde bekletmiş ve bu 1 çevrim oluşturmuştur. Toplamda 10 çevrimde deneyi sonlandırmıştır. Yaptığımız çalışmada bu çalışmaya benzer olarak 24 saat -18°C 'de dondurucuda bekletilmiştir (Resim 3.29).



Resim 3.29 Derin dondurucuda -18°C 'de çevrime sokulan örnekler.

Derin dondurucudaki donma işlemi sonrasında numuneler çözülmesi için $+20^{\circ}\text{C}$ 'de 12 saat süresince suya doygun olarak bekletilerek 30 çevrim uygulanmıştır (Resim 3.30).



Resim 3.30 Donma işlemi sonrası suya doygun bekletilen örnekler.

3.3.6 Makro Özellikler

3.3.6.1 Gözenek Boyut Analizleri

Numunelerin gözenek boyutlarının incelemek için 20x boyutunda büyütme yapabilen polarizan mikroskop kullanılmıştır (Resim 3.31).



Resim 3.31 Polarizan mikroskop.

3.3.7 Mikro Özellikler

3.3.7.1 Taramalı Elektron Mikroskobu

Örneklerin mikro yapılarının incelenmesi için AKÜ-TUAM’da bulunan Leo 1430 VP model elektron mikroskop kullanılmıştır (Resim 3.32). Numuneler incelemeye tabi tutulmadan önce yüzeyleri karbon (C) ile kaplanmıştır.



Resim 3.32 Leo 1430 VP model elektron mikroskobu.

3.3.7.2 XRD Analizi

Numunelerin minerolojik analizlerini incelemek için X-Işınları Difraksiyon (XRD) yöntemi kullanılmıştır. Hammaddelerin XRD analizleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi- Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (AKÜ-TUAM)’da bulunan Shimadzu marka XRD-6000 model XRD cihazı kullanılmıştır (Resim 3.33).

Her numune 5-80° arasında 2°/dk olacak şekilde analiz edilmiştir.



Resim 3.33 Shimadzu XRD-6000 model XRD cihazı

4. BULGULAR

Bu bölümde çalışmadan elde edilen veriler sunulmuş ve birbirleriyle kıyaslanarak bilimsel çıkarımlar yapılmıştır. Çalışmada beton deneyleri iki kısma ayrılmış ve taze beton deneyleri ile sertleşmiş beton verileri ayrı ayrı sunulmuştur.

Yapılan çalışmada birim hacim ağırlık, su/ bağlayıcı oranı, lif oranı, köpük yoğunluğu, karışıma giren alçı gibi oranlar sabit tutulmuş olup, karışım içerisindeki uçucu kül miktarı, hacme göre köpük miktarı değişken olarak kullanılmıştır. Karışıma giren uçucu kül miktarı test sonuçlarında değişkenlik gösterilmesine sebep olmuştur. Numune karışım miktarları beton karışım hesabı yapılarak numune üretilecek şekilde belirlenmiştir. Üretilen numunelerde S/B oranı tüm seriler için 0,40 olacak şekilde uygulanmıştır. TSE K 314 “Köpük Betondan Mamul Yerinde Döküm, Taşıyıcı Olmayan Duvar Elemanları” standardı esas alınarak, Basınç dayanımı sınıflandırmasındaki 5 farklı sınıftan 3. sınıf üretim hedeflenmesinden dolayı kuru birim hacim ağırlıkları yaklaşık 800 kg/m³ ve 1000 kg/m³ olacak şekilde hesaplamalar yapılmıştır.

4.1 Taze Köpük Beton Deneyleri

4.1.1 Akış Süresi ve Yayılma Deneyleri

Harç üretim aşamasında betonun kıvamını belirlemek, üretilen harçların aynı kıvama sahip olmasını sağlayabilmek ve benzer özelliklere sahip beton üretilmesi amacıyla yayılma deneyleri yapılmıştır.

Çalışmada kontrol serisi ve uçucu kül katkılı homojen hale getirilmiş köpük beton örneklerinin taze haldeyken akış süresi ve yayılma değerleri kayıt altına alınmıştır (Çizelge 4.1).

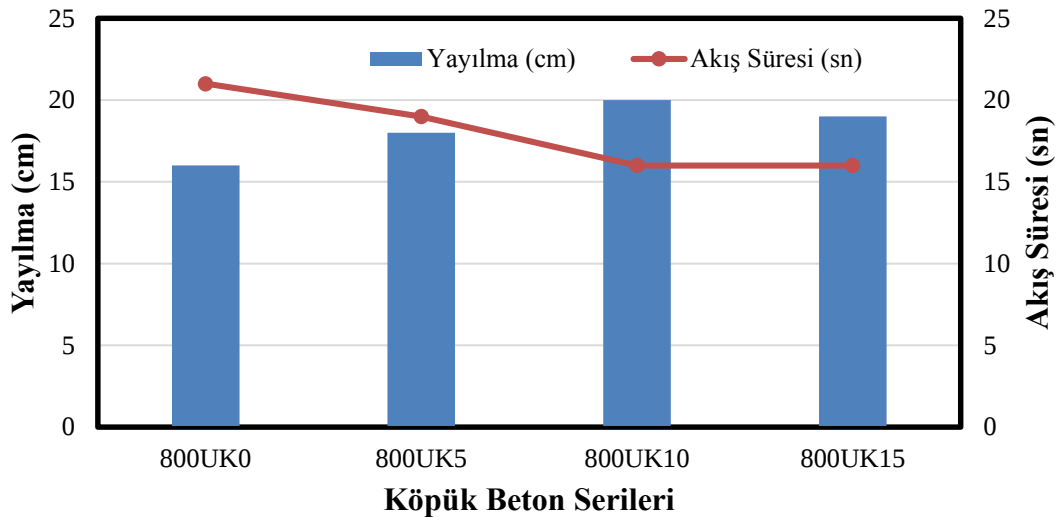
Taze harç üretimlerinde yapılan deneylerde yayılma ile akış süresi arasındaki ters bir orantı görülmüştür. Marsh hunisi ile yapılan deneyde karışım harcının 1 litrelik kabı

doldurması için geçen süre (akış süresi) attıkça karışım harcının yayılma çapında azalma gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.1 Köpük beton harç yayılma ve akış süresi değerleri.

Seri No	Taze Harç Ağırlığı	Yayılma (cm)	Akış Süresi (sn)	Açıklama
800UK0	921	16	22	Sabit ve düzenli akış
800UK5	928	18	19	Sabit ve düzenli akış
800UK10	936	20	16	Sabit ve düzenli akış
800UK15	920	19	16	Sabit ve düzenli akış
1000UK0	1130	18	24	Sabit ve düzenli akış
1000UK5	1114	16.5	20	Sabit ve düzenli akış
1000UK10	1129	19	23	Sabit ve düzenli akış
1000UK15	1110	17	20	Sabit ve düzenli akış

Akış süresinin azalması ise yayılma çapında artışa sebep olmuştur. 800 kg/m³ köpük beton serileri için yayılma ve akış süresi grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.

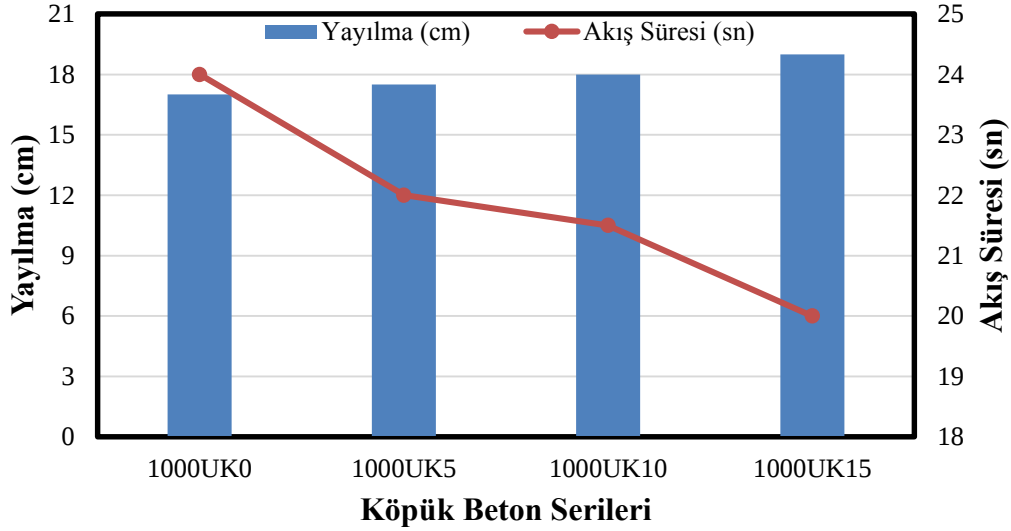


Şekil 4.1 Yayılma akış süresi değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).

Akış şeklinin kesiksiz bir şekilde sürekli olması ve akış süresinin ise ne çok kısa ne de çok uzun olması istenmektedir. Akış süresinin kısa olması köpük miktarının düşük düzeyde kaldığını, litreye giren birim ağırlığın fazla olacağını göstermektedir. Akış süresinin uzun olması ise köpük miktarındaki fazlalığı ve litreye giren birim ağırlığın düşük olacağını göstermektedir (Akdere 2023) .

Akış sürelerinin tamamı 1 dakikanın altında gerçekleşmiş olup sabit ve düzenli akış elde edilmiştir.

Birim ağırlığı 1000 kg/m^3 olarak hedeflenen köpük beton serileri için taze harç yayılma ve akış süresi grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Yayılma akış süresi değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m^3).

4.1.2 Taze Birim Ağırlık

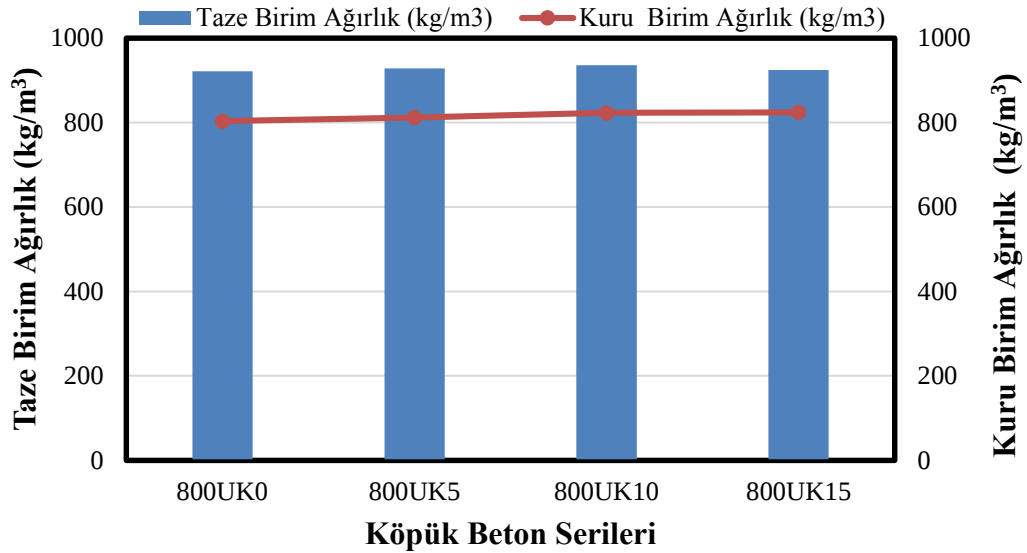
TS 314’ de herhangi bir harmana ait ve TS EN 12390-7’ ye göre belirlenmiş sertleşmiş betonun yoğunluğu, plastik haldeki yoğunluğuna göre 50 kg/m^3 daha fazla ve 150 kg/m^3 daha az olmasına izin verilebilir denmektedir. TSE K 600’e göre kütle ve toleransları ortalama olarak, ölçülen kuru kütle değeri, beyan değerine $\pm \%10$ sapma sınırları dahilinde uygun olmalıdır. Üretilen taze harç numunelerinde elde edilen birim ağırlıkları 800 kg/m^3 hedeflenen numuneler için $921\text{-}936 \text{ kg/m}^3$ ve 1000 kg/m^3 hedeflenen numuneler için $1110\text{-}1130 \text{ kg/m}^3$ arasında tespit edilmiştir (Çizelge 4.2). Çalışmada birim ağırlığı 800 kg/m^3 olarak tasarlanan serilerde yaklaşık % 12, 1000 kg/m^3 olarak tasarlanan serilerde ise yaklaşık % 10’luk bir ağırlık kaybı ölçülmüştür. (Şekil 4.3).

Çalışmada 800 kg/m³'lük serilerde karışım içerisindeki uçucu kül yüzdesinin artması ve karışıma giren köpük malzeme miktarının azalmasından kaynaklı olarak taze birim ağırlıklarda bir miktar artış gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.2 Köpük beton numunelerin birim ağırlık değerleri.

Seri No	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)
800UK0	921	803
800UK5	928	812
800UK10	936	823
800UK15	920	824
1000UK0	1130	1000
1000UK5	1114	1013
1000UK10	1129	1027
1000UK15	1110	997

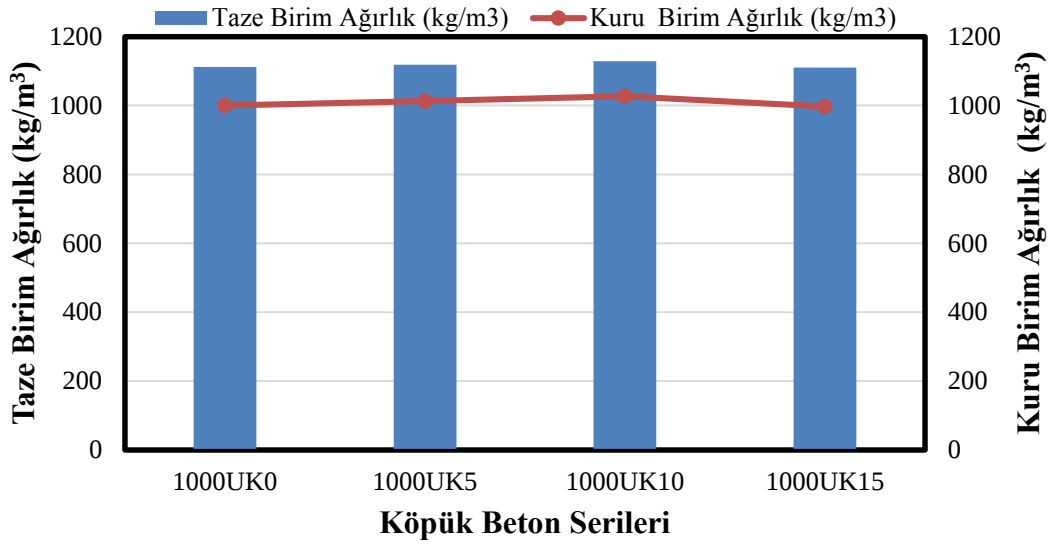
Elde edilen taze birim ağırlıkların birbirine yakın olduğu, hedeflenen kuru birim ağırlıkları standartta (TSE K 600) belirlendiği şekilde elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Taze birim ağırlık ve kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).

Yuan vd. (2022) yaptıkları çalışmada % 50 ve % 80 arasında değişen yüksek hacimlerde kireç hamuru ve uçucu kül kullanarak ürettikleri 800 ve 900 kg/m³ taze birim ağırlığa numunelerde kuru birim ağırlık olarak yaklaşık % 25-30 birim ağırlık kaybı gerçekleşmiştir.

Çimento dozajındaki artışla birlikte karışım taze birim ağırlıkları artırılmış ve kuru birim ağırlıklar 1000 kg/m³ hedef ağırlığa uygun olacak şekilde standartlara uygun olarak elde edilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Taze birim ağırlık ve kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

4.2 Sertleşmiş Köpük Beton Deneyleri

4.2.1 Fiziksel Özellik Testleri

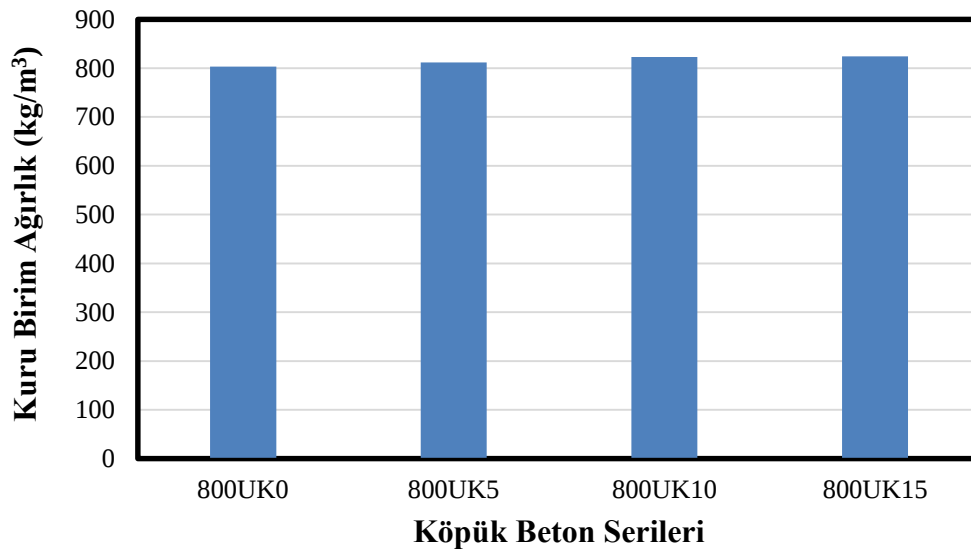
4.2.1.1 Kuru Birim Ağırlık Sonuçları

Kuru birim ağırlıklar için hedeflenen sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen numunelerde elde edilen birim ağırlıkları 800 kg/m³'lük serilerde 803-824 kg/m³ arasında ve 1000 kg/m³'lük serilerde 997-1027 kg/m³ arasında tespit edilmiştir (Çizelge 4.3). Bu değerler TSE K 600'e uyum sağlamaktadır.

Çizelge 4.3 Köpük beton numunelerin kuru birim ağırlık değerleri.

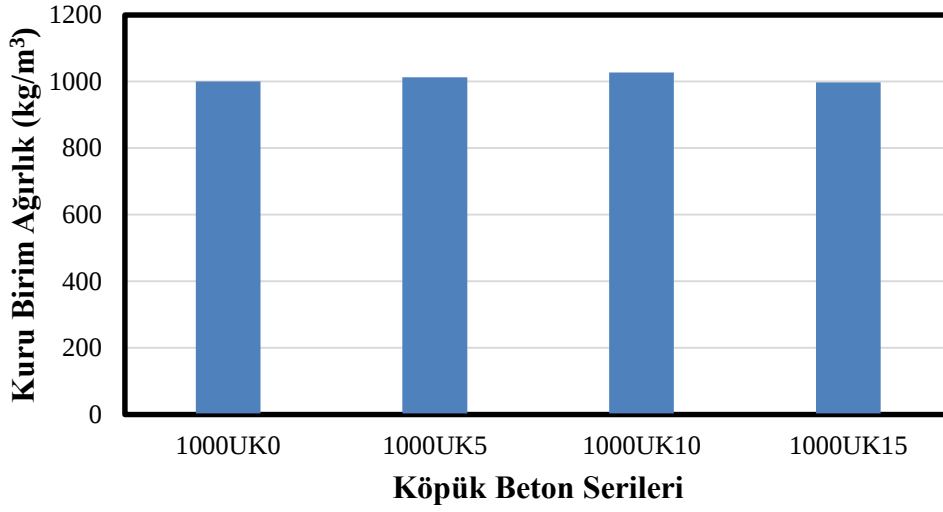
Seri No	Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)
800UK0	803
800UK5	812
800UK10	823
800UK15	824
1000UK0	1000
1000UK5	1013
1000UK10	1027
1000UK15	997

Hedeflenen birim ağırlık değerleri 800 kg/m³ olarak belirlenen serilerde birbirine yakın kuru birim ağırlık değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).

Hedeflenen kuru birim ağırlık değerleri 1000 kg/m³ olarak belirlenen serilerde 4 seri için de birbirine yakın kuru birim ağırlık değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Kuru birim ağırlık değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

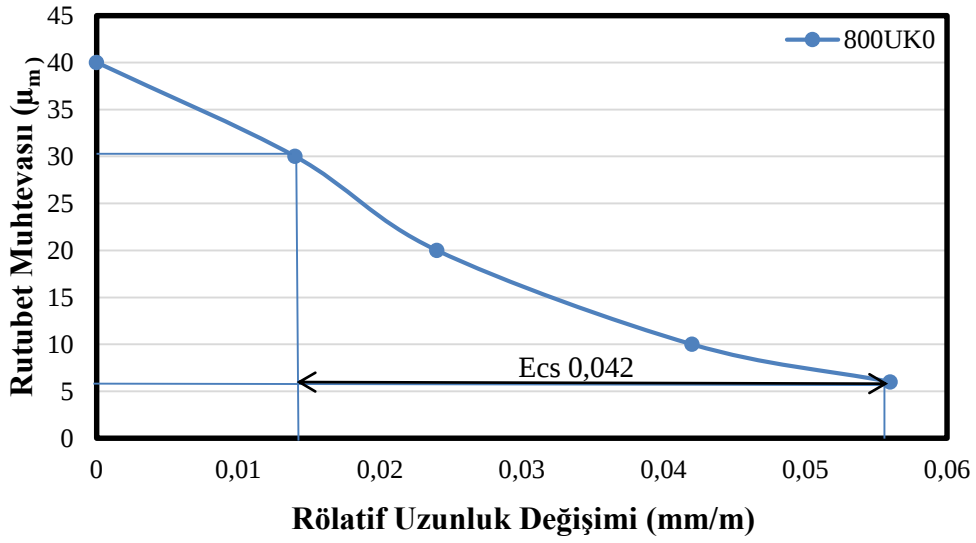
4.2.1.2 Rölatif Uzunluk Değişimi Sonuçları

Deney örneklerinin her biri için rutubet muhtevası TS EN 680'e göre hesap edilmiş olup, rölatif uzunluk değişiminin hesaplanması yapılmış ve buradan da kuruma büzülmesinin geleneksel değerinin tayini metoduyla rölatif uzunluk değişmesi değerleri hesaplanmıştır. Buna göre % 40, % 30, % 20, % 10 ve % 6 nem oranlarındayken numunelerin uzunlukları kayıt altına alınmış olup elde edilen veriler ayrı ayrı verilmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 Köpük beton numunelerin rölatif uzunluk değişim değerleri.

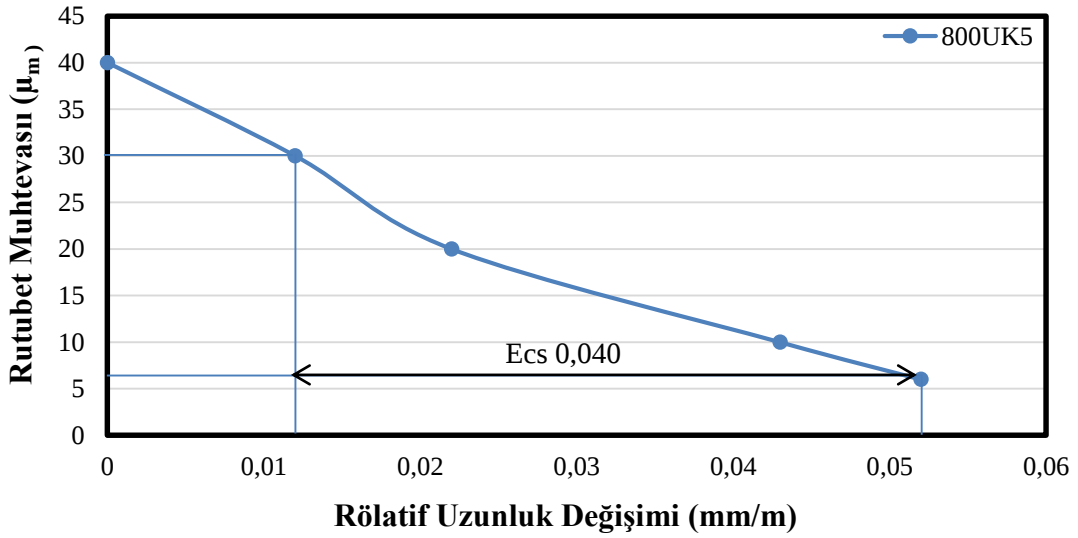
Seri No	Rölatif Uzunluk Değişimi (mm/m)
800UK0	0.042
800UK5	0.040
800UK10	0.038
800UK15	0.033
1000UK0	0.043
1000UK5	0.035
1000UK10	0.027
1000UK15	0.016

Birim ağırlığı 800 kg/m³ olan serilerde kontrol serisi 800UK0 için rölatif uzunluk değişmesi Şekil 4.7'de verilmiştir. Kontrol serisinde E_{cs} 0.042 mm/m olarak elde edilmiştir. En yüksek rölatif uzunluk değişimi kontrol serisinde elde edilmiştir.



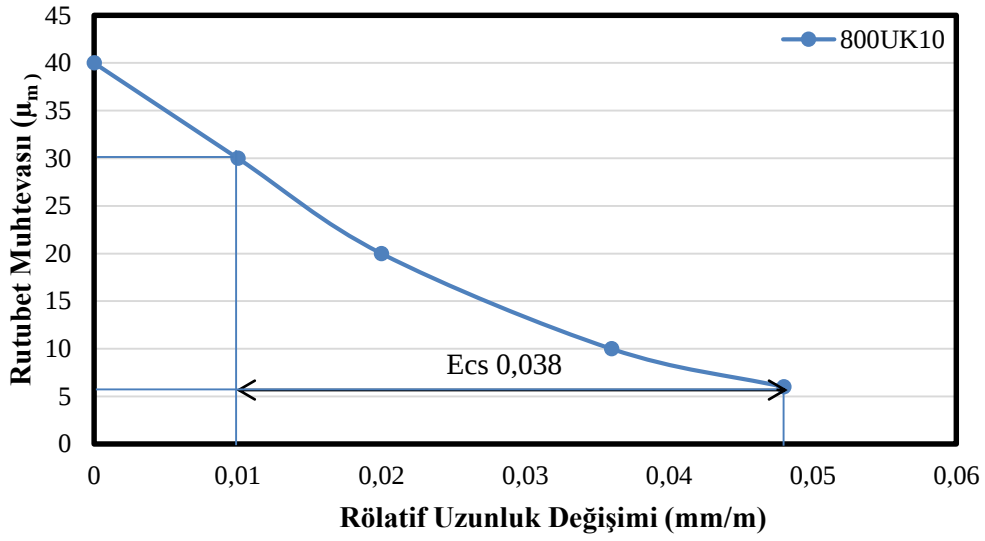
Şekil 4.7 800UK0 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 5 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.8’de verilmiştir. Karışımdaki bağlayıcı olan çimentoya % 5 oranında uçucu kül ikame edilmiştir. UK ilavesiyle birlikte rölatif uzunluk değişiminde azalma görülmeye başlanmıştır.



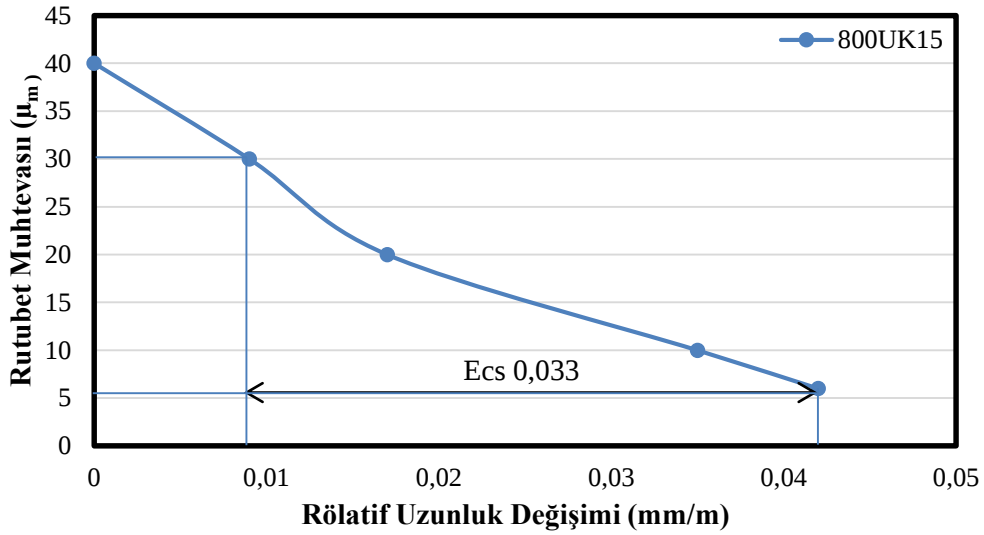
Şekil 4.8 800UK5 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 10 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Karışımdaki uçucu kül oranının artmasıyla birlikte rölatif uzunluk değişimindeki azalma artmış olup 0.038 mm/m’ye düşmüştür.



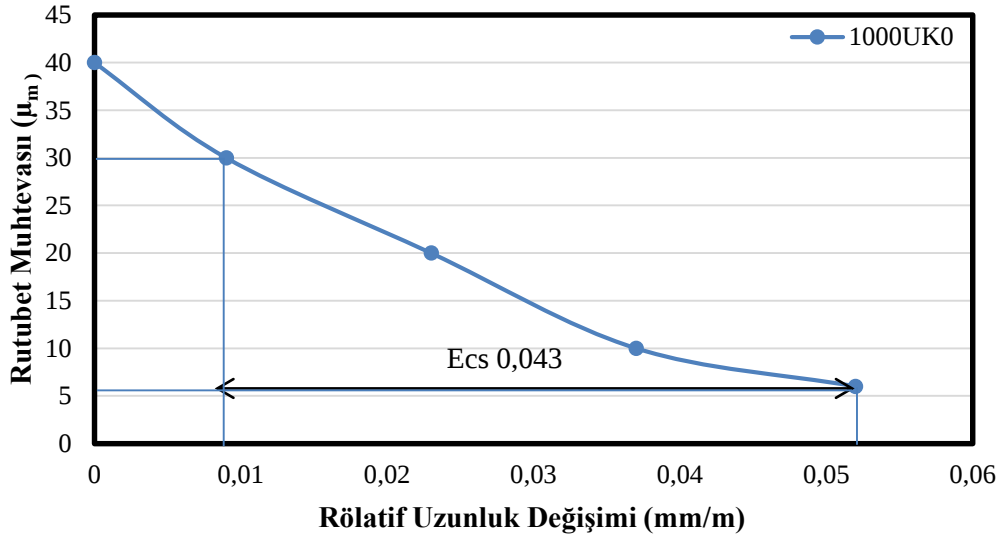
Şekil 4.9 800UK10 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 15 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.10'da verilmiştir. Son olarak karışıma giren uçucu kül oranı % 15'e çıkartılmış ve Ecs 0.033 ile en düşük rölatif uzunluk değişimi bu seride elde edilmiştir.



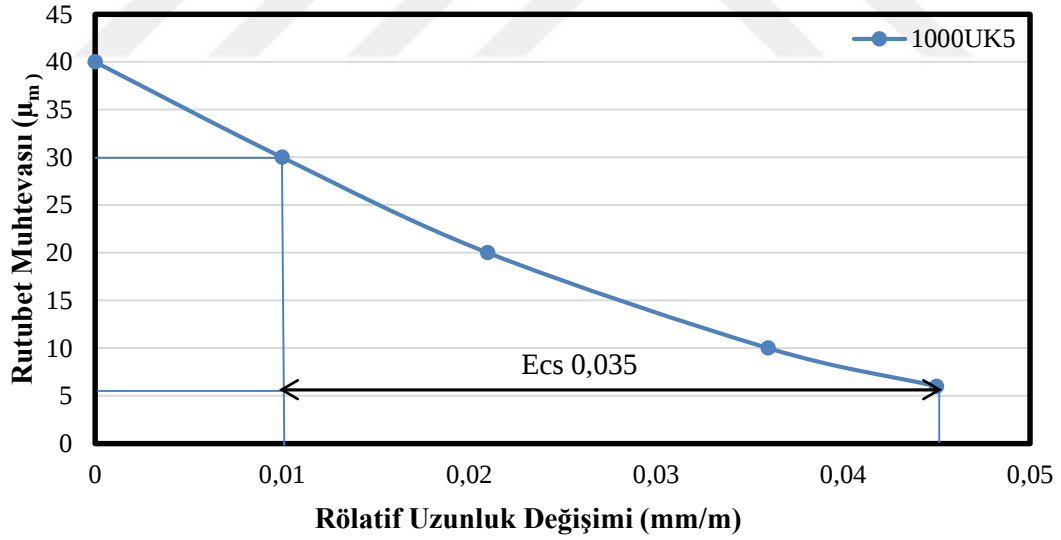
Şekil 4.10 800UK15 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Birim ağırlığı 1000 kg/m^3 olan serilerde ise 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip serilere göre daha düşük küçülmeler elde edilmiştir. Kontrol serisi için rölatif uzunluk değişmesi Şekil 4.11' de verilmiştir. Kontrol serisinde E_{cs} 0.043 olarak elde edilmiştir. En yüksek rölatif uzunluk değişimi kontrol serisinde elde edilmiştir (Şekil 4.11).



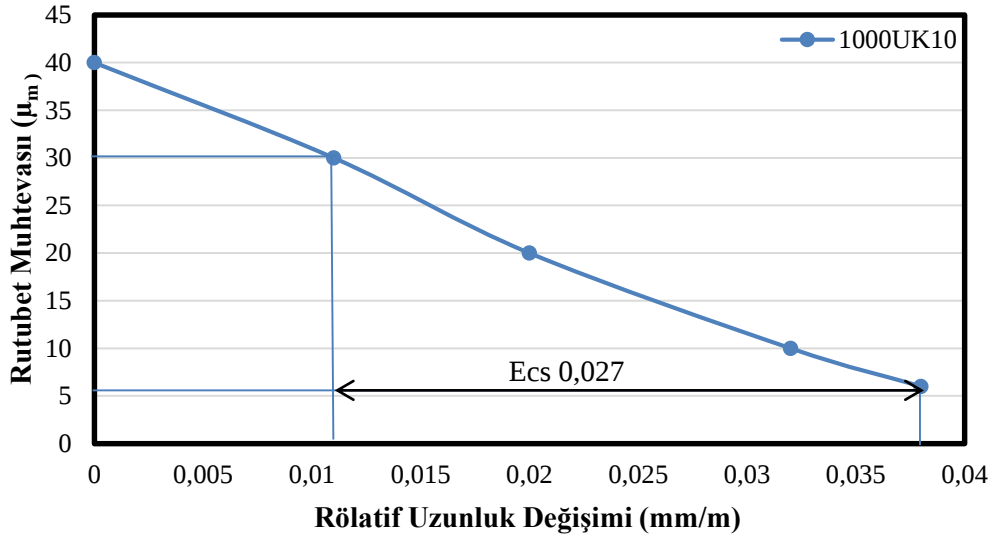
Şekil 4.11 1000UK0 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 5 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.12’de verilmiştir. Karışıma uçucu kül girmesiyle birlikte rölatif uzunluk değişimindeki azalma olup elde edilen değer 0.035’e düşmüştür.



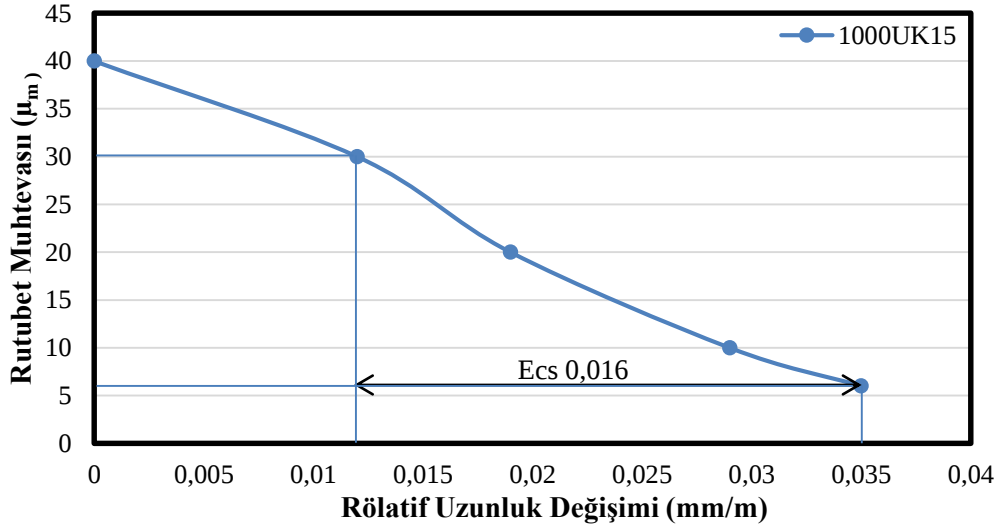
Şekil 4.12 1000UK5 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 10 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir. Bünyedeki uçucu kül miktarındaki artışla birlikte rölatif uzunluk değişimindeki azalma olup değişim 0.027 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.13 1000UK10 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Uçucu kül katkı oranı % 15 olan seri için rölatif uzunluk değişimi Şekil 4.14’de verilmiştir. Bünyedeki uçucu kül miktarındaki artışla birlikte en az çimento içeren seri olması dolayısıyla hidrasyon ısısının düşüşünden kaynaklı olarak rölatif uzunluk değişimindeki azalma olup en küçük değer olan 0.016 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14 1000UK15 serisinin rutubet muhtevalarına göre rölatif uzunluklarındaki değişim.

Rölatif uzunluk değişimi etkileyen faktörlerden biri karışım içerisine giren köpük miktarıdır. Köpük miktarındaki artış ve sıcaklığın artması rötrede artışa sebep

olmaktadır. Köpük betonda rölatif uzunluk değişimine sebep olan bir diğer etken ise karışımlara giren ince malzeme miktarının ve toplam yüzey alanının daha yüksek olmasıdır.

Köpük betonda mukavemet değerlerinin normal betona göre oldukça düşük olması sebebiyle, yüksek büzülmenin neden olduğu iç gerilmelerin, köpük beton bünyesinin mukavemet değerlerini aştığı durumlarda büzülme çatlakları meydana gelmektedir (Demir 2014).

Yuan vd. (2022)'nin çalışmasında elde ettiği sonuçlara göre daha düşük birim ağırlığa sahip serilerde yapılan testlerde içerikteki kireç çamuru ve uçucu kül oranları % 0'dan % 50'ye çıkarıldığında numunelerdeki rölatif uzunluklarında % 23 oranında azalma elde etmiştir.

4.2.1.3 Su Emme Deneyi Sonuçları

Su emme oranları dona karşı dayanım açısından önemli parametrelerdir. Bünyede oluşan porların açık por olması ve içeriğe eklenecek mineral ve kimyasal katkılar su emmeyi etkilemektedir. Su emme deneyi için kür sürelerine göre 7, 28 ve 90 günlük küp numuneler kullanılmıştır. Her iki birim ağırlık serilerinde de en düşük değer, uçucu kül katkısı bulunmayan kontrol serisinde elde edilmiş olup en yüksek su emme ise % 15 uçucu kül katkılı serilerde elde edilmiştir. Burada karışıma giren uçucu kül oranının artmasıyla birlikte serilerin daha fazla su emmeye maruz kaldığı belirlenmiştir.

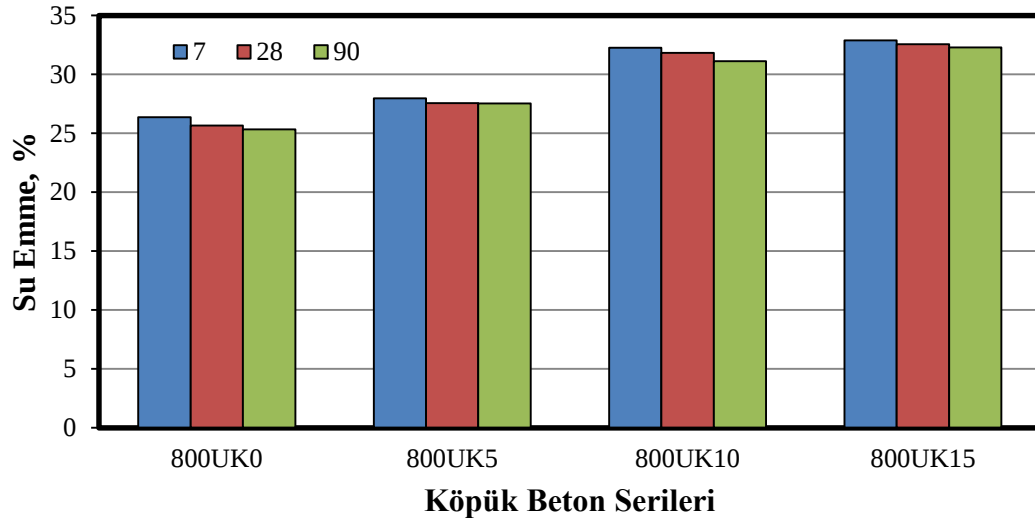
Elde edilen veriler Çizelge 4.5'de verilmiş olup sonuçlardan elde edilen grafik Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.5 Köpük beton numunelerin su emme değerleri.

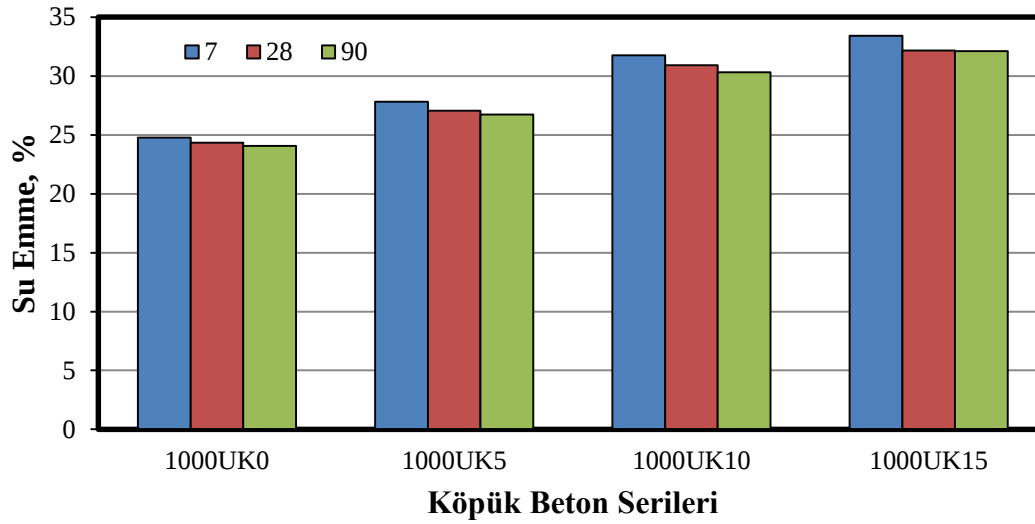
Seri No	Kür Süresi (Gün)	Su Emme (%)
800UK0	7	26.4
800UK5		28.0
800UK10		33.3
800UK15		36.9
800UK0	28	25.7
800UK5		27.6
800UK10		31.8
800UK15		32.6
800UK0	90	25.3
800UK5		27.5
800UK10		31.1
800UK15		32.3
1000UK0	7	24.8
1000UK5		27.8
1000UK10		31.8
1000UK15		33.4
1000UK0	28	24.3
1000UK5		27.1
1000UK10		30.9
1000UK15		32.2
1000UK0	90	24.1
1000UK5		26.7
1000UK10		30.3
1000UK15		32.1

Su emme oranlarında kür süresi uzadıkça su emmede azalma gerçekleşmiş ancak içerikteki uçucu kül oranları arttıkça artış görülmüştür. Buna neden olarak uçucu külün çimento ile ikamesinde uçucu külün daha düşük yoğunluğu nedeniyle birim hacim içerisinde daha fazla yer kapladığı ve gözenekli yapısından dolayı daha fazla su emdiği değerlendirilmektedir.

Çimentonun su ile reaksiyonu sonucu CSH jeli oluşur ve CH açığa çıkar. CH daha sonraki süreçte uçucu kül ile reaksiyona girerek yeni CSH jelleri oluşturur. Buna göre uzayan kür süreci sonunda ikincil reaksiyonların tamamlanması ile beton bünyesi daha kararlı hale gelerek su emme oranını düşürmesi olarak açıklanabilmektedir.



Şekil 4.15 Su emme değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).



Şekil 4.16 Su emme değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

Burada kontrol serisinin daha az boşluklu bir yapıya sahip olmasından ve oluşan gözeneklerin kapalı yapıya sahip olmasından dolayı daha az su emmeye maruz kaldığı görülmüştür.

Shahidan vd. (2017) yaptığı çalışmadaki köpük beton serilerinde benzer birim ağırlıklara sahip üretimler yapmış ve yaklaşık % 24 su emme değerleri elde etmiştir.

4.2.1.4 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

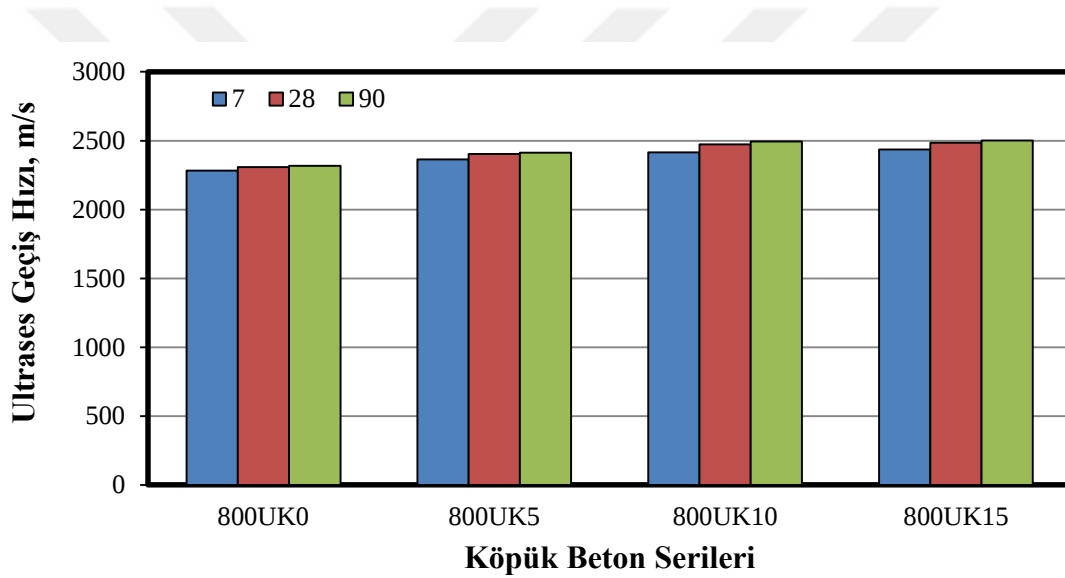
Sertleşmiş köpük beton deneyleri arasındaki ultrases geçiş hızı deneyi tüm numunelere uygulanmıştır. Veriler Çizelge 4.6’da verilmiş olup deneylerden elde edilen verilere göre numunelerdeki uçucu kül yüzdesinin artışıyla birlikte kontrol serisine göre ultrases geçiş hızlarında artış olduğu gözlemlenmiştir, sonuçlar Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de verilmiştir.

Çizelge 4.6 Köpük beton numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Ultrases Geçiş Hızı (m/s)
800UK0	7	2282
800UK5		2364
800UK10		2415
800UK15		2435
800UK0	28	2308
800UK5		2404
800UK10		2474
800UK15		2485
800UK0	90	2318
800UK5		2412
800UK10		2494
800UK15		2501
1000UK0	7	2304
1000UK5		2351
1000UK10		2476
1000UK15		2482
1000UK0	28	2482
1000UK5		2494
1000UK10		2612
1000UK15		2620
1000UK0	90	2526
1000UK5		2535
1000UK10		2773
1000UK15		2782

Şekil 4.17 incelendiğinde ultrases geçiş hızı değerlerinin 2282 ile 2501 m/s arasında

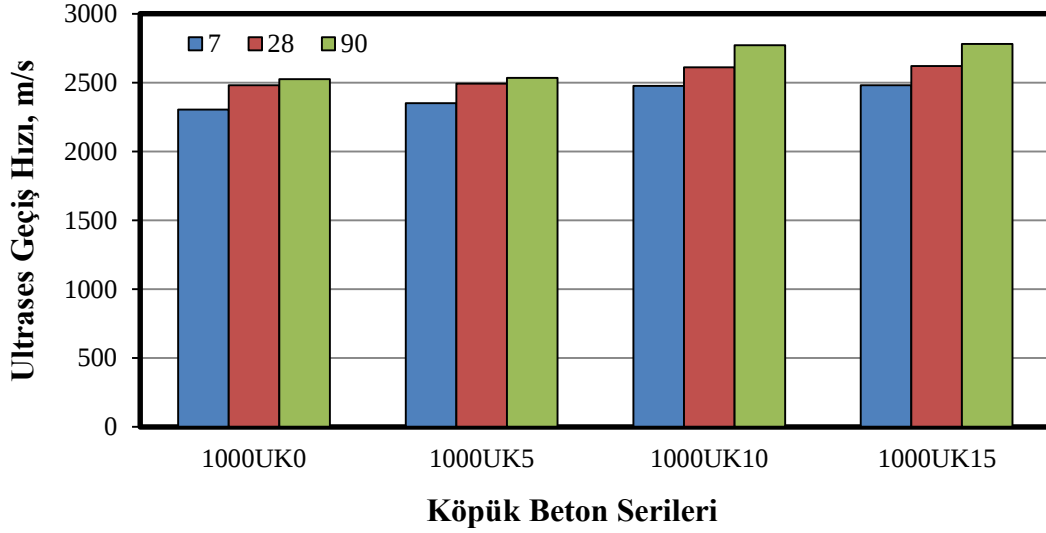
değiştii görülmüştür. En düşük değerler 7 gün boyunca kür uygulanan 800UK0 serisinden elde edilirken en yüksek değerler ise 90 gün boyunca kür uygulanan 800UK15 serisinden elde edilmiştir. Tüm köpük beton serileri incelendiğinden kür süresinin artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarında artışların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çimento yerine kullanılan UK oranlarının artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarının arttığı sonucuna varılmıştır. Kür süresi 7 gün olan seriler incelendiğinde 800UK0 serilerine göre 800UK5, 800UK10 ve 800UK15 serilerinin ultrases geçiş hızları sırasıyla %3.59, % 5.83 ve % 6.70 oranlarında artmıştır. Kür süresi 28 ve 90 gün olan serilerdeki artış oranları ise sırasıyla % 4.16, % 7.19, % 7.67 ve % 4.06, % 7.59, % 7.89 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.17 Ultrases geçiş hızı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).

Şekil 4.18'den görüldüğü üzere ultrases geçiş hızı değerlerinin 2304 ile 2782 m/s arasında değiştiği görülmüştür. En düşük ve en yüksek değerler 800 kg/m³ olan serilere benzer şekilde elde edilmiştir. 800 kg/m³ birim ağırlığa sahip serilerde olduğu gibi kür süresinin artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarında artışların olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.18 incelendiğinde UK oranlarının artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarının arttığı sonucuna varılmıştır. Örneğin kür süresi 7 gün olan seriler incelendiğinde 800UK0 serilerine göre 800UK5, 800UK10 ve 800UK15 serilerinin ultrases geçiş hızları sırasıyla % 2.04, % 7.47 ve % 7.73 oranlarında artmıştır. Elde

edilen verilere göre % 15 uçucu kül içeren seride ise 7, 28 ve 90 gün kür uygulanan numunelerin ultrases geçiş hızlarında % 10 uçucu kül içeren seriye oranla benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Ultrases geçiş hızı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

Ultrases geçiş hızı beton bünyenin yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Birim ağırlığın artması ile üretilen köpük betonun bünyesinde gözenekliliğin azalmasına ve ultrases geçiş hızının artmasına sebep olması beklenmektedir. Ancak birim ağırlık verileri oluşan durumu açıklamak için tek başına etkili olmamaktadır. Gözenek miktarı, gözeneklerin boyutu, şekli ve dağılımları da ultrases geçiş hızı değeri için önem taşımaktadır (Akdere 2023). Yoğunluk artışı ile birlikte basınç mukavemeti ve ultrases geçiş hızı değerleri yükselmiştir. Dede (2019) yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasında uçucu kül katkılı serilerde uçucu kül katkısız kontrol serilerine göre ultrases geçiş hızının daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Bu durum uçucu külün ince tane boyutu ile daha boşluksuz bir yapı sağlayarak ultrases geçiş hızını arttırdığı görülmüştür. Wei vd. (2014)'nin yaptığı köpük beton çalışmasında ultrases geçiş hızıyla köpük beton davranışı incelemesi yapmış ve 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip seriler ultrases geçiş hızının UK oranı arttıkça yavaşladığı ve UK oranı düştükçe hızı arttığı görülmüştür. % 60 UK ikameli serilerde 50 saatlik test sonucunda 1500 m/s hız elde edilirken % 20 UK içeren serilerde hız yaklaşık 1800 m/s seviyelerinde ölçülmüştür.

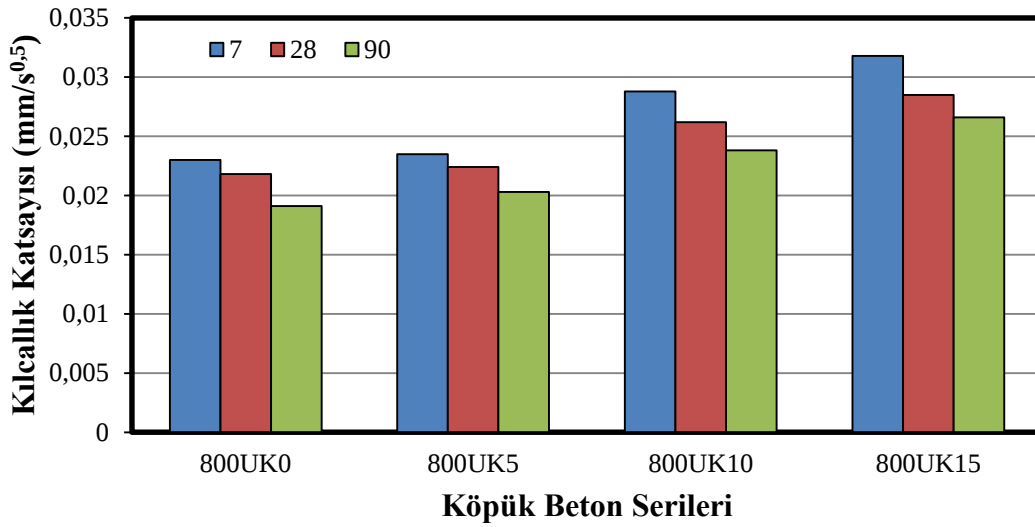
4.2.1.5 Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Kılcallık katsayısı sonuçlarının uçucu kül oranına göre değişimi Çizelge 4.7’de verilmiştir. Çizelge 4.7 incelendiğinde 800 kg/m³ seriler için elde edilen kılcallık katsayısı sonuçlarının 0.0191 ile 0.0318 mm/sn^{0.5} değerleri arasında ve 1000 kg/m³ seriler için 0.0194 ile 0.0250 mm/sn^{0.5} arasında değiştiği görülmüştür. En düşük kılcallık katsayısı değerleri % 0 uçucu kül içeren serilerinden elde edilirken en yüksek kılcallık katsayısı değerleri her iki birim ağırlık serilerinde de % 15 uçucu kül içeren serilerde gerçekleşmiştir.

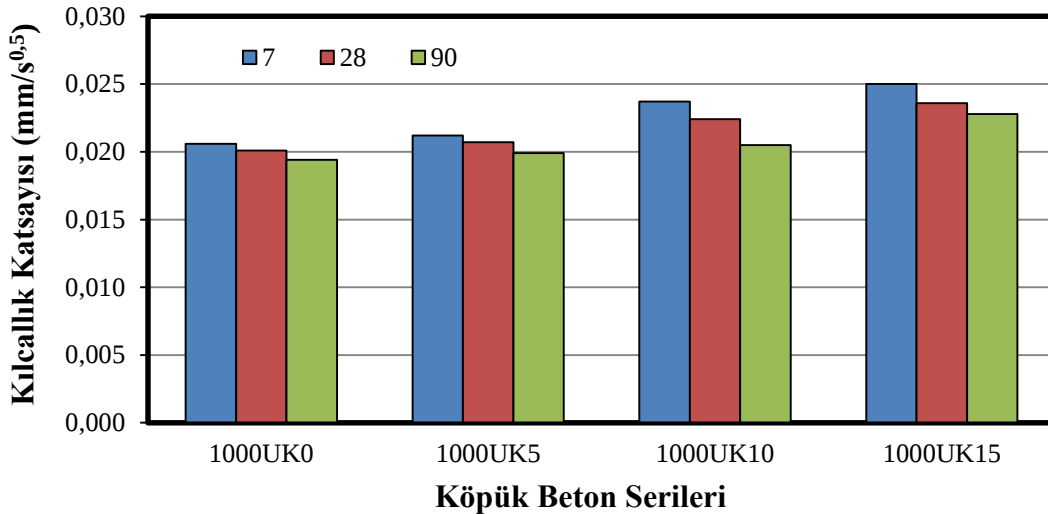
Çizelge 4.7 Köpük beton numunelerin kılcallık katsayısı değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Kılcallık Katsayısı (mm/s ^{0.5})
800UK0	7	0.0230
800UK5		0.0235
800UK10		0.0288
800UK15		0.0318
800UK0	28	0.0218
800UK5		0.0224
800UK10		0.0262
800UK15		0.0285
800UK0	90	0.0191
800UK5		0.0203
800UK10		0.0238
800UK15		0.0266
1000UK0	7	0.0206
1000UK5		0.0212
1000UK10		0.0237
1000UK15		0.0250
1000UK0	28	0.0201
1000UK5		0.0207
1000UK10		0.0224
1000UK15		0.0236
1000UK0	90	0.0194
1000UK5		0.0199
1000UK10		0.0205
1000UK15		0.0228

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20 incelendiğinde uçucu kül kullanım oranlarındaki yükseliş kılcal su emmeyi artışı desteklemektedir. Bunun yanı sıra düşük birim ağırlığa sahip olan serilerde bünyeyi hafifletmek için kullanılmış olan köpük katkısının gözenek oluşumunun fazla ve daha büyük çapta olmasından dolayı kılcallık katsayılarında artış görülmüştür. Kür süresindeki artış ise numune içerisindeki reaksiyonların devamından kaynaklı stabil duruma geçişin devam etmesinden dolayı kılcal katsayılarında azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.19 Kılcallık katsayısı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).



Şekil 4.20 Kılcallık katsayısı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

Jennings vd. (2015) yaptıkları çalışmada maruz kalınan su etkisinin CSH ve genel olarak çimento içeren malzemelerin nano/mikro yapısı hakkında önemli bilgiler içerdiğini ve kılcal gözeneklerin kurutma esnasında hiç değişmediği veya çok az değiştiğini belirtmiştir.

4.2.2 Mekanik Özellik Testleri

4.2.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

Köpük betonların minimum basınç dayanımı ortalamasının 3. Sınıfa giren numuneler için minimum 3.30 N/mm^2 olması gerekmektedir (TSE K 314 2014). Basınç dayanımı testlerinde 800 kg/m^3 'lük serilerde 5.13 ile 5.88 MPa arasında ve 1000 kg/m^3 'lük serilerde ise 5.82 ile 9.21 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaşılmıştır (Çizelge 4.8).

Elde edilen değerlere göre tüm serilerdeki basınç mukavemeti değerleri TSE K 314' e göre birim hacim ağırlığı $>700 \text{ kg/m}^3 \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ olan sınıf için minimum ortalama 3.30 N/mm^2 olan 3. sınıf değerlerini karşılamaktadır.

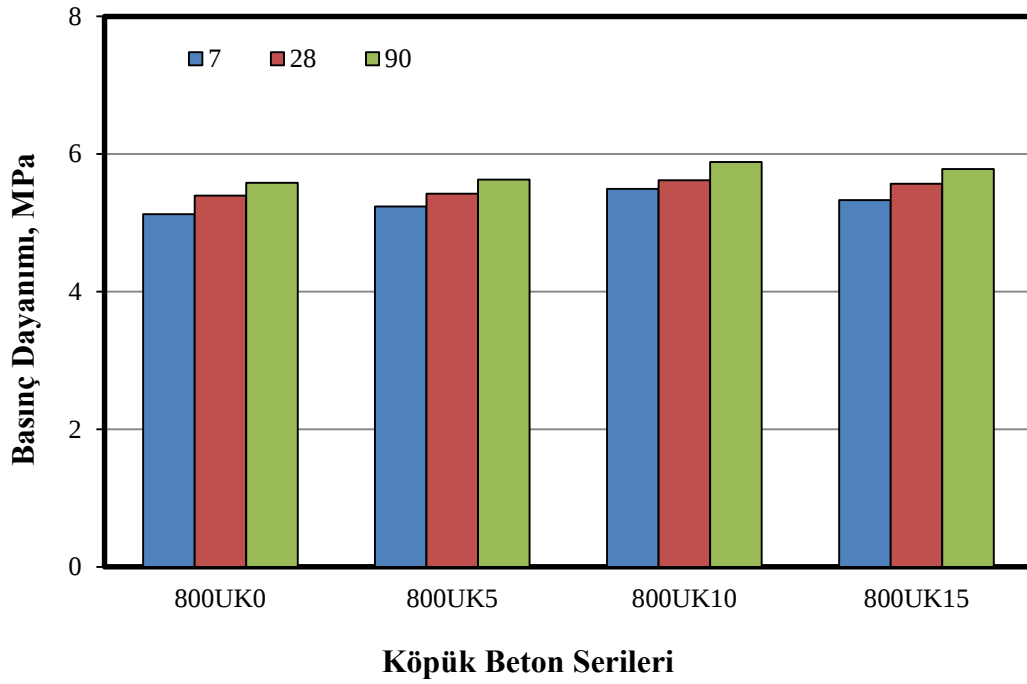
Üretilen uçucu kül katkılı serilerin tümünde ve 3 farklı kür süresinde de kontrol serisi numunelere göre basınç dayanımlarında artış elde edilmiştir. Kür süresi 7 gün olan numunelerde, 800UK15 serisinin basınç dayanımında 800UK10 serisine göre % 3.46 bir düşüş gerçekleşmiş olup, 1000UK15 serisinde ise basınç dayanımında 100UK10 serisine göre % 2.97 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. Bunun sebebi olarak uçucu külün karışımda ikame oranının artmasıyla birlikte karışıma giren çimento miktarının azalması ve uçucu kül tanelerinin hidrasyon reaksiyonunu tamamlamamış olması nedeniyle yeterince CSH oluşmadığından % 15 uçucu kül içeren serilerin nihai dayanımının azaldığı görülmüştür.

Çizelge 4.8 Köpük beton numunelerin basınç dayanımı değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Basınç Dayanımı (MPa)
800UK0	7	5.13
800UK5		5.24
800UK10		5.49
800UK15		5.33
800UK0	28	5.39
800UK5		5.42
800UK10		5.62
800UK15		5.57
800UK0	90	5.58
800UK5		5.63
800UK10		5.88
800UK15		5.78
1000UK0	7	5.82
1000UK5		6.43
1000UK10		6.74
1000UK15		6.54
1000UK0	28	6.18
1000UK5		6.89
1000UK10		7.23
1000UK15		7.16
1000UK0	90	8.04
1000UK5		8.42
1000UK10		9.21
1000UK15		8.52

Kür süresi 28 gün olan numuneler için, 800UK15 serisinin basınç dayanımında 800UK10 serisine göre % 0.89 bir düşüş gerçekleşmiş olup, 1000UK15 serisinin basınç dayanımında ise 1000UK10 serisine göre % 0.97 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir.

Birim ağırlık değeri 800 kg/m^3 olan seriler için elde edilen sonuçlar Şekil 4.21’de grafik olarak sunulmuştur.

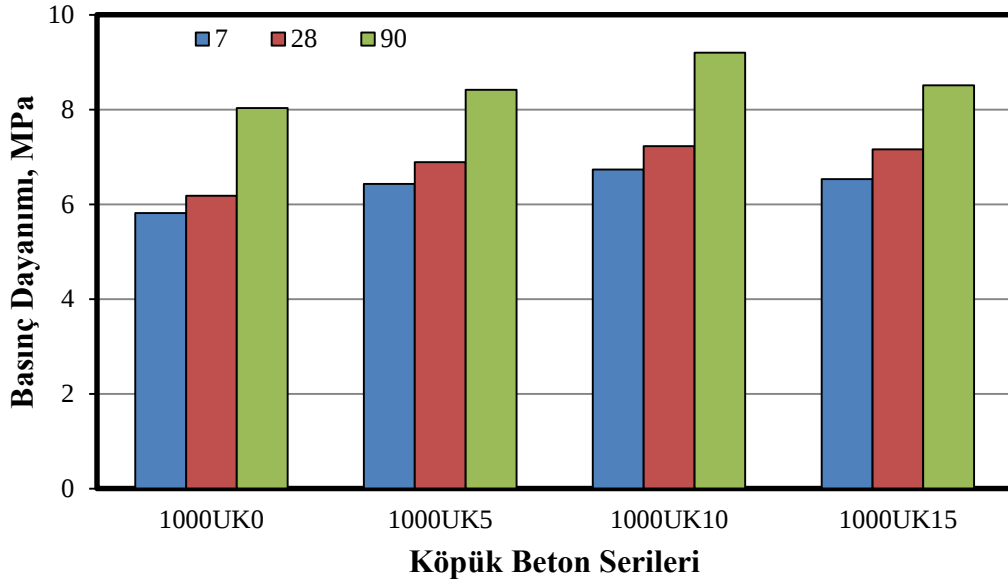


Şekil 4.21 Basınç dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m^3).

Uzayan (90 gün) kür süresi sonunda tüm serilerde 7 ve 28 günlük kür sürelerine göre dikkate değer mukavemet artışları gelişmiştir. Buna uzayan kür süresinde uçucu külün pozolanik özelliğinden kaynaklanan ikincil reaksiyonların gelişerek yeni CSH fazları üretmesinin neden olduğu değerlendirilmektedir.

Kılınçarslan ve Tuzlak (2018)'ın yaptığı çalışmada 28 gün kür edilen 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip % 30 uçucu kül katkılı köpük beton serilerinde 1.18 MPa dayanım elde edildiği görülmüştür.

Birim ağırlık değeri 1000 kg/m^3 olan seriler için elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de grafik olarak sunulmuştur.



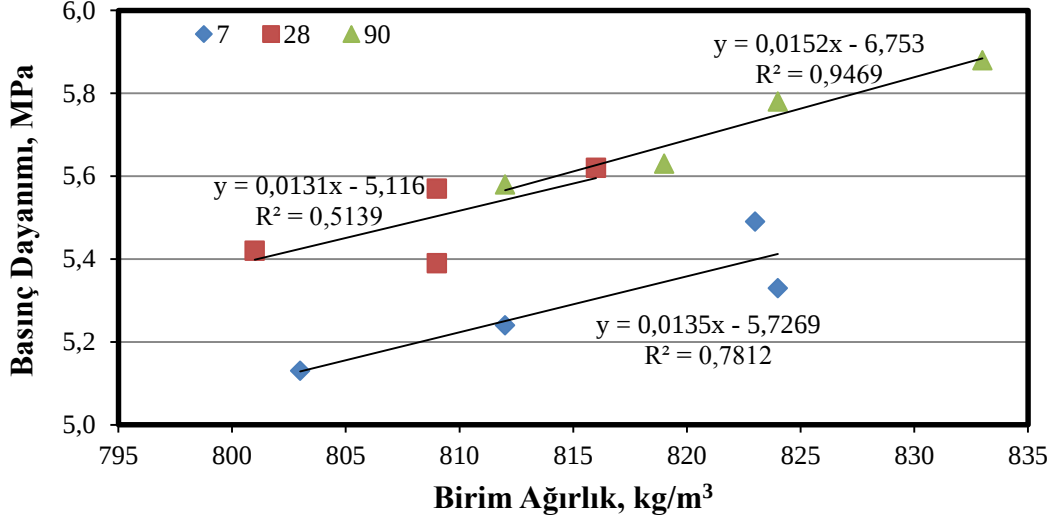
Şekil 4.22 Basınç dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

4.2.2.2 Basınç Dayanımı- Birim Ağırlık İlişkisi

Birim ağırlık değeri 800 kg/m³ olan seriler için ile basınç dayanımı sonuçları arasındaki ilişki incelendiğinde birim ağırlıktaki düşük farkla birlikte kür süresindeki artış ile tüm serilerde kontrol serisine göre basınç dayanımlarının arttığı ancak % 15 uçucu kül katkılı seride basınç dayanımında % 10 uçucu kül içeren seriye göre azalma olduğu tespit edilmiştir.

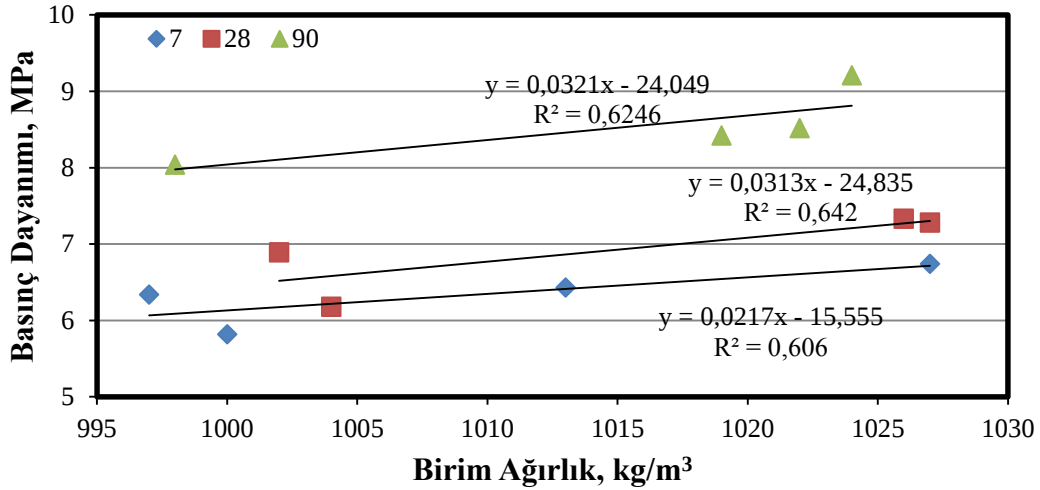
Yedi ve 28 günlük kür sürelerinde elde edilen değerlerde 90 günlük kür süresi değerlerine göre azalma görülmüştür. Buna neden olarak karışımdaki çimentonun azalması, karışımda uçucu kül miktarının artması ile henüz reaksiyona girmeyen ve hidrate olamamış uçucu kül tanelerinin olması, bunun sonucunda ise zayıf CSH gelişimlerinin bulunması basınç dayanımında düşüşe sebep olmuştur. Ancak 90 günlük kür süresi sonunda tüm serilerde artış olmakla birlikte özellikle uçucu kül katkılı serilerde dikkate değer mukavemet artışları kaydedilmiştir. Buna uzayan kür süresi sonunda uçucu külün puzolanik aktivite göstererek yeni CSH fazları üretmesi ve mukavemete katkı yapmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Mikro yapı analizleri de bu sonuçları doğrulamaktadır (Bölüm 4.6).

800 kg/m³'lük seriler için birim ağırlık ile basınç dayanımı sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23 Basınç dayanımı- birim ağırlık sonuçları arasındaki ilişki (800 kg/m³).

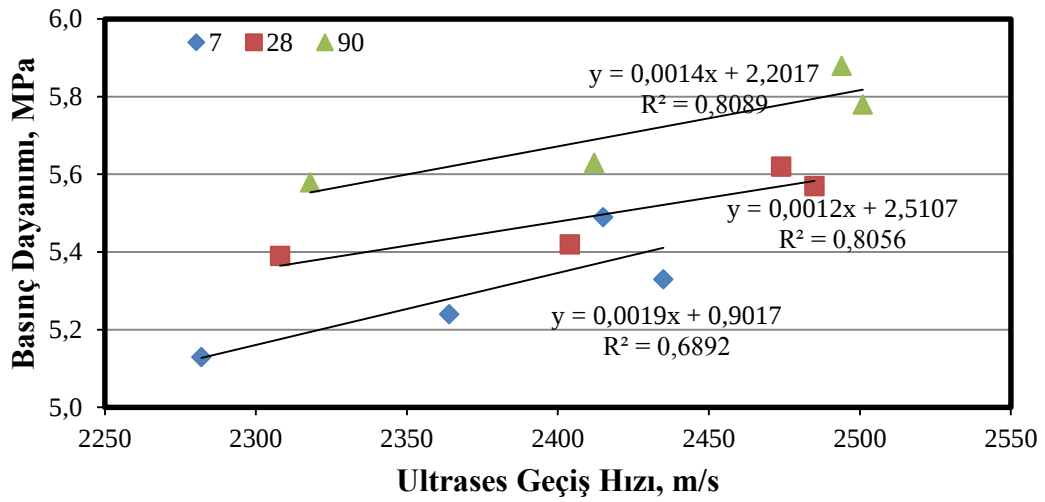
1000 kg/m³'lük seriler için birim ağırlık ile basınç dayanımı sonuçları arasındaki ilişki Şekil 4.24'de verilmiştir. Birim ağırlıklarda düşük farklar olmasına rağmen kür sürelerinin artışıyla birlikte basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir.



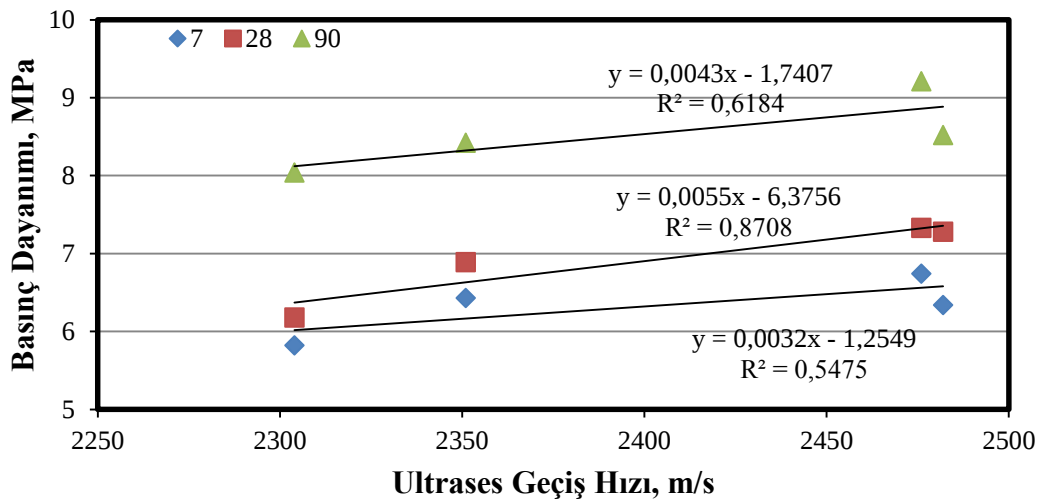
Şekil 4.24 Basınç dayanımı- birim ağırlık sonuçları arasındaki ilişki (1000 kg/m³).

4.2.2.3 Basınç Dayanımı- Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi

Ultrases geçiş hızı ölçümleri tüm serilere uygulanmıştır. Uçucu kül katkısı içeren serilerin tümünde kontrol serilerine göre ultrases geçiş hızlarının arttığı ve basınç dayanımı artışıyla ilişkili olduğu görülmüştür. Her iki birim ağırlık sınıfında da artan mukavemet değerlerine bağlı olarak ultrases geçiş hızlarında artış kaydedilmiştir. Bunun mukavemet artışı ile birlikte daha sıkı ve dolu bir bünye yapısının oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir (Şekil 4.25, Şekil 4.26).



Şekil 4.25 Basınç dayanımı- ultrases geçiş hızı sonuçları arasındaki ilişki (800 kg/m³).



Şekil 4.26 Basınç dayanımı- ultrases geçiş hızı sonuçları arasındaki ilişki (1000 kg/m³).

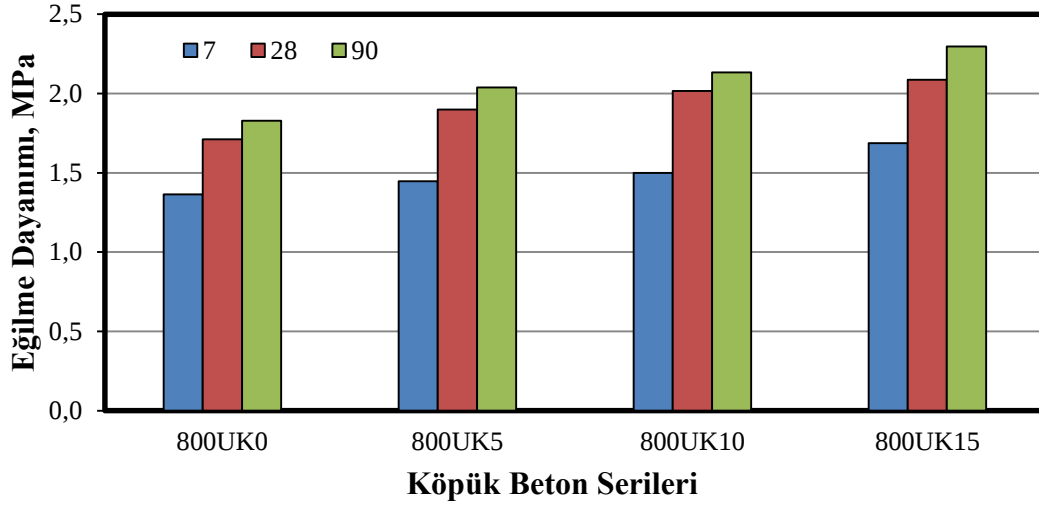
4.2.2.4 Eğilme Dayanımı Sonuçları

Eğilme dayanımı testleri donatısız 4x4x16 cm'lik prizma numunelere uygulanmıştır. Sonuçlar 800 kg/m³'lük ve 1000 kg/m³'lük seriler için Çizelge 4.9'da verilmiştir. 800 kg/m³ birim ağırlığa ait serilerde en düşük eğilme dayanımı 1.36 MPa ile 7 günlük kontrol serisinde elde edilirken en yüksek değer ise 90 günlük % 15 uçucu kül katkılı seride 2.30 MPa olarak elde edilmiştir. 1000 kg/m³ birim ağırlığa ait serilerde ise diğer seriye benzer olarak en düşük değer 7 günlük kontrol serisinde 2.13 MPa olarak, en yüksek değer ise % 15 uçucu kül katkılı seride 3.09 MPa olarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler grafik olarak 800 kg/m³'lük seriler için Şekil 4.29'da ve 1000 kg/m³'lük seriler için Şekil 4.30'da verilmiştir.

Çizelge 4.9 Köpük beton numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

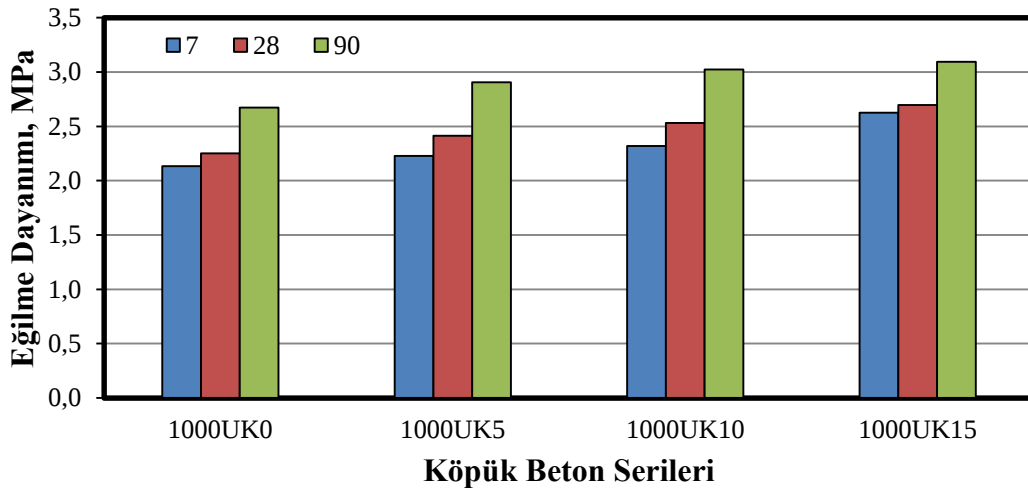
Seri No	Kür Süresi (Gün)	Eğilme Dayanımı (MPa)
800UK0	7	1.36
800UK5		1.45
800UK10		1.50
800UK15		1.69
800UK0	28	1.71
800UK5		1.90
800UK10		2.02
800UK15		2.09
800UK0	90	1.83
800UK5		2.04
800UK10		2.13
800UK15		2.30
1000UK0	7	2.13
1000UK5		2.23
1000UK10		2.32
1000UK15		2.63
1000UK0	28	2.25
1000UK5		2.41
1000UK10		2.53
1000UK15		2.70
1000UK0	90	2.67
1000UK5		2.91
1000UK10		3.02
1000UK15		3.09

Şekil 4.27 incelendiğinde kontrol serilerindeki eğilme dayanımının uçucu kül katkı serilere göre daha düşük kaldığı görülmüştür. Kür süresine bağlı olarak serilerde eğilme mukavemetleri de karışım oranlarına göre kendi içinde bir artış sağlamış ve uçucu kül katkı oranının artışıyla birlikte eğilme dayanımları da artmıştır. Buna göre eğilme dayanımları da basınç dayanımı değerlerindeki değişimler ile uyum sağlamaktadır.



Şekil 4.27 Eğilme dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (800 kg/m³).

Şekil 4.28 incelendiğinde birim ağırlıklardaki artışla birlikte kür süresi ve içerikteki kül oranı artışıyla birlikte eğilme dayanımları da artmıştır. En yüksek eğilme dayanımı % 15 uçucu kül içeren 90 günlük serilerde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.28 Eğilme dayanımı değerlerinin köpük beton serilerine göre değişimi (1000 kg/m³).

Falliano vd. (2019) yaptıkları deneysel çalışmada üç farklı kütleme koşulunda, üç hedef kuru yoğunlukta (400, 600, 800 g/dm³) ve üç farklı lif içeriğinde (% 0.7, % 2.0, % 5.0) numuneler üretmişlerdir. Sonuç olarak özellikle düşük yoğunluklu ve yüksek lif içerikli numunelerde eğilme kapasitelerinin arttığı, fakat basınç dayanımlarındaki değişimin ihmal edilebilir boyutta olduğunu görmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde eğilme dayanımlarında uçucu kül oranı arttıkça eğilme dayanımı artmıştır.

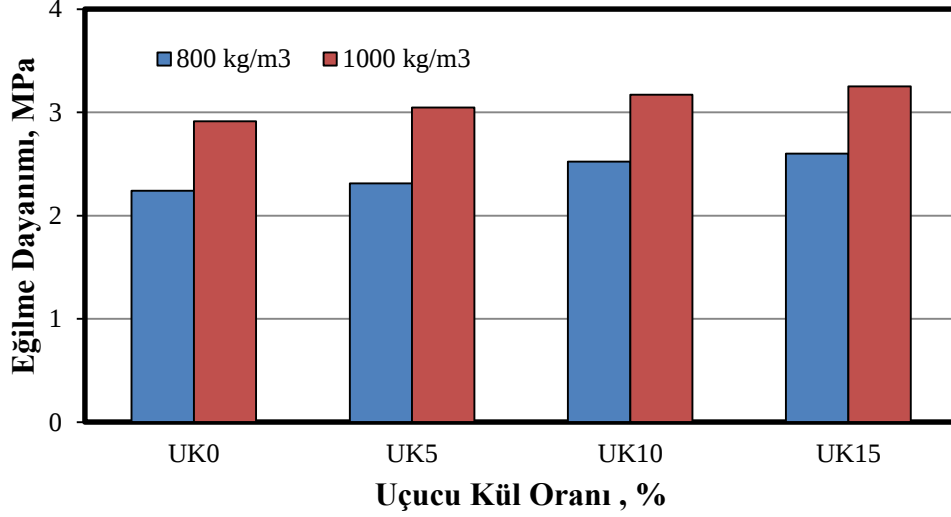
Donatılı duvar panelleri için yapılan eğilme mukavemeti deney sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Duvar paneli deneyleri yalnızca 90 gün küre tabi tutulan numunelere uygulanmıştır. Üretilen serilerde eğilme dayanımı 800 kg/m³ birim ağırlığa sahip numuneler 2.24 MPa ile 2.60 MPa arasında değerler elde edilmiş olup en yüksek dayanım % 15 uçucu kül katkılı seride elde edilmiştir. 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip numuneler için ise benzer şekilde 3.2 MPa ile en yüksek oran olan % 15 uçucu küllü serilerde elde edilmiştir.

Çizelge 4.10 Donatılı üretilen duvar paneli numunelerin eğilme dayanımı değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Eğilme Dayanımı (MPa)
800UK0	90	2.24
800UK5		2.31
800UK10		2.52
800UK15		2.60
1000UK0	90	2.91
1000UK5		3.05
1000UK10		3.17
1000UK15		3.25

Eğilme dayanımı testlerinde karışıma giren uçucu kül miktarının artmasıyla birlikte eğilme dayanımlarında artış elde edilmiştir. Fadila vd. (2008), İbrahim vd. (2014) ise dayanımlarda artışın sebebi olarak donatıların mikro çatlakların oluşmasına engel olduğu, enerji yutma kapasitesini arttırdığı ve dayanımlarda yükseliş gösterdiğini tespit etmişlerdir.

800 kg/m³ ve 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip seriler için donatılı duvar panellerine ait grafik Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29 Donatılı duvar panelleri için eğilme dayanımlarının uçucu kül oranına göre değişimi.

Qubro vd. (2023)’nin çalışmasına göre % 25.42 çimento, % 8.48 uçucu kül ve % 50.85 kum katkılı serilerde yapılan testlere göre ortalama 3 MPa eğilme dayanımları elde etmiştir.

4.3 Fonksiyonel Özellikler Testleri

4.3.1 Zamana Bağlı Yüzey Sıcaklığı Geçiş Simülasyon Sonuçları

Köpük beton ürünlerin üretimi esnasında bünyesinde % 80-90 oranında gözenek yapısı oluşmaktadır. Ortalama çapı 1 mm olan gözenekler kapalı ve birbiri ile bağlantısız yapıda oluşmaktadır. Köpük beton ürünler hafif bünye yapıları ve yüksek orandaki gözenek yapısı sayesinde ısı yalıtım özelliği kazanmaktadır.

Malzemelerin ısı iletim özelliklerindeki en önemli olan faktörler birim ağırlığa bağlı porozite oranı, gözeneklerin yapısı ve dağılım şekli, muhtevanın mineral yapısı ve gelişen faz yapıları olarak sıralanabilmektedir. Bir cismin iki yüzeyinin arasında

sıcaklık farkının bulunması durumunda sıcak taraftan soğuk tarafa doğru bir ısı akışı gerçekleşmektedir (Davraz 2015). Yüzey sıcaklığı geçiş değerleri 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip numuneler için % 1.24 ile % 3.24 arasında değişmektedir. 800UK0 serisi için numune yüzeyinin $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 'den fazla sıcaklığa maruz bırakılması öncesinde yapılan ölçüm ile sıcaklık değeri alınan plakanın, 5 dakika süresince ısıya maruz bırakılması sonrasında plaka arka yüzeyindeki sıcaklıkta % 1.24'lük artış gerçekleşmiştir. Bu artış 800UK15 serisi için % 3.24 olarak ölçülmüştür. 1000UK0 serisinde ise % 1.53 oranında bir sıcaklık artışı görülürken % 15 uçucu kül içeren 1000UK15 serisinde % 3.42'lik bir artış gerçekleşmiştir. Bunun uçucu kül katkılı serilerde kür süreleri sonunda daha dolu bir bünye yapısı oluşmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Pürmüzle sıcaklık verilmesi öncesi termal kamerayla yapılan ölçüm değeri ile sıcaklık verilmesi sonrası plakanın arkasında yapılan ölçüm sonucu oluşan sıcaklık artışı Çizelge 4.11'de verilmiştir.

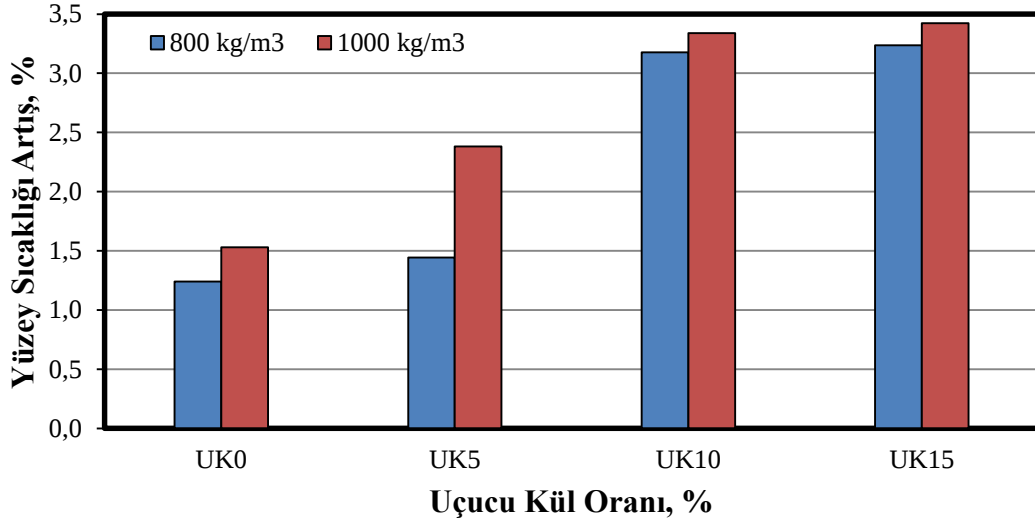
Çizelge 4.11 Köpük beton plaka numunelerin yüzey sıcaklık artış değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Yüzey Sıcaklık Artışı (%)
800UK0	90	1.24
800UK5		1.44
800UK10		3.18
800UK15		3.24
1000UK0	90	1.53
1000UK5		2.38
1000UK10		3.34
1000UK15		3.42

Xi vd. (2021) tarafından yürütülen bir çalışmada yoğunluk artışının köpük beton ısı iletkenliğinin katkısız referans köpük betona göre % 11 ile % 100 arasında arttırdığı bulunmuştur. Çimento ağırlığının % 54'üne kadar uçucu kül ya da toplam hacmin % 90'ına kadar genleşmiş polistiren katkısının neredeyse hiçbir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

Şekil 4.30 incelendiğinde uçucu külün % 5, % 10 ve % 15 oranlarında kullanıldığında sıcaklık geçiş direncine olumlu bir katkı yapmadığı görülmüştür. Uçucu kül oranının artmasıyla birlikte plaka arkasında ölçülen sıcaklıklarda artış gerçekleşmiştir. Karışıma

ilave edilen köpük miktarının azalmasından kaynaklı olarak gözenek miktarının azalmasıyla birlikte sıcaklık geçiş direncinde de azalma görülmüştür.



Şekil 4.30 Yüzey sıcaklığı artışının uçucu kül oranına göre değişimi.

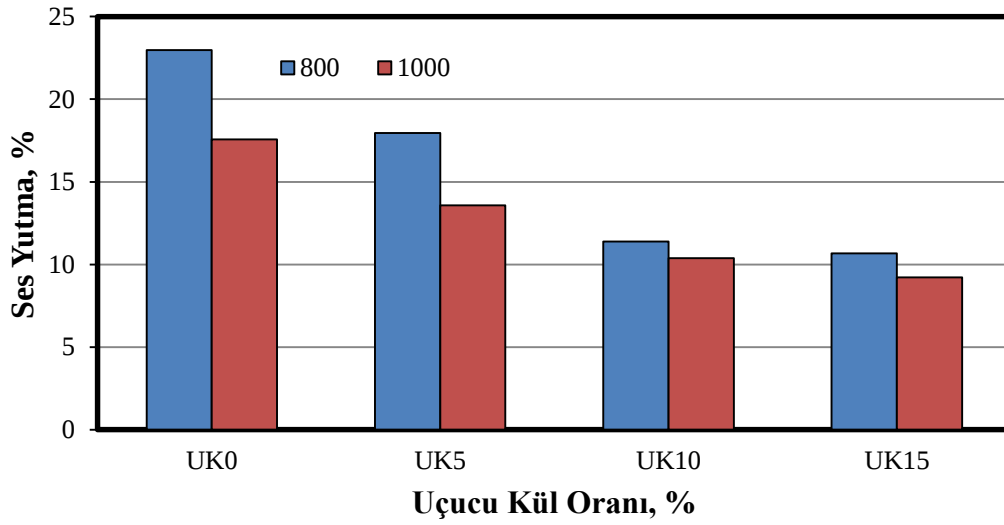
4.3.2 Akustik Özellik Simülasyon Sonuçları

Shang vd. (2022) yaptığı çalışmada köpük beton için orta frekanslarda (700-1600 Hz) ses yutma özelliğinin geliştiğini tespit etmiştir. Bu sebeple üretilen köpük beton numunelerin ses yutma özelliklerinin daha verimli olarak ölçülebilmesini sağlamak amacıyla ölçümler için 729 Hz frekansı tercih edilmiştir. Ses kaynağından üretilen ses şiddeti ölçümü yapılmış, desibel olarak kayıt altına alınmış ve sonrasında 300x300x50 mm boyutlarında kare kesitli olarak üretilen plakalardan bir ses kutusu oluşturulmuştur. Ses kaynağı kutu içerisine konularak kutu kapatılmış ve tekrar ölçüm yapılmıştır. Akustik özellikler; karışım içerisine ilave edilen köpük miktarına bağlı olarak değişim gösteren gözenek yapısı köpük betonların normal betonlara oranla daha yüksek ses yutma özelliği göstermesine neden olmaktadır. Gözeneklerin yüzeylerinin uçucu külle kaplanması neticesinde bir çekirdek-kabuk yapıli gözenek sistemi meydana gelmesi, düşük ve yüksek frekans bölgelerinde (50–400 Hz, 1600–3000 Hz) ses yutma üzerinde kayda değer bir etki göstermemiş olsa da orta frekanslarda (700–1600 Hz) ses yutma özelliğinin iyileşmesini sağlamıştır (Shang vd, 2022).

Çizelge 4.12’de akustik özelliğe bağlı elde edilen sonuçlar verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek ses yutma olarak 800UK0 serisinde % 22.97 ile gerçekleşmiş olup en düşük ses yutma ise % 9.21 olarak 1000UK15 serisinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.12 Köpük beton numunelerin ses yutma değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Ses Yutma (%)
800UK0	90	22.97
800UK5		17.95
800UK10		11.39
800UK15		10.67
1000UK0	90	17.57
1000UK5		13.58
1000UK10		10.39
1000UK15		9.21



Şekil 4.31 Ses yutma değerinin uçucu kül oranına göre değişimi.

Şekil 4.31 incelendiğinde elde edilen verilere göre en yüksek akustik yalıtım özelliğinin 800 kg/m³ birim ağırlığa sahip uçucu kül katkısı bulunmayan kontrol serisinde % 22.97’lik bir ses yutma değeriyle en yüksek değer elde edildiği görülmüştür. Diğer serilerde değişken olarak kullanılan uçucu kül oranının artışı ve birime giren köpük hacminin azalması sebebiyle gözenek sayısının azalmasından dolayı akustik yalıtım

değerlerinde azalmaya yol açtığı değerlendirilmektedir. 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip seriler için de kontrol serisinde en yüksek ses yutma değeri % 17.57 ile elde edilmiş olup, artan uçucu kül katkı oranı ve azalan köpük miktarıyla ses yalıtımında azalma gerçekleşmiştir.

4.4 Durabilite Testi

4.4.1 Donma Çözülme Dayanımı Sonuçları

Donma çözülme testleri öncesi ve sonrası birim ağırlık verileri Çizelge 4.13’de, verilmiştir. Buna göre 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip kontrol serisinde % 1.68 ile en düşük ağırlık kaybı değeri elde edilirken, en yüksek ağırlık kaybı değeri 800 kg/m³ birim ağırlığa sahip % 15 uçucu kül katkılı seride elde edilmiştir. Bunun neden olarak 800UK15 serisinin 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip serilere göre daha düşük basınç dayanımına sahip olmasından dolayı donma çözülme kaynaklı iç gerilmelere daha fazla maruz kalması, iç gerilmelere dayanımın düşüklüğü ve yapıda bozulmaya sebep olması dolayısıyla ağırlık kaybı oluşması olarak açıklanabilmektedir.

Çizelge 4.13 Köpük beton numunelerin donma çözülme öncesi ve sonrası ağırlık kaybı değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Donma Çözülme Öncesi Ağırlık (kg/m ³)	Donma Çözülme Sonrası Ağırlık (kg/m ³)	Ağırlık Kaybı (%)
800UK0	90	823	811	1.94
800UK5		831	808	2.77
800UK10		846	803	5.08
800UK15		854	800	6.32
1000UK0	90	1012	990	1.68
1000UK5		999	971	2.80
1000UK10		1063	1021	3.95
1000UK15		1016	967	4.82

Donma-çözülme sonrası ultrases geçiş hızı verileri Çizelge 4.14’de verilmiştir. Burada 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip kontrol serisinden en küçük ultrases geçiş hızı kaybı elde edilmiş olup en yüksek kayıp ise 800UK15 serisinde elde edilmiştir. Bünye içeriğindeki uçucu kül oranı artışıyla birlikte kayıplarda da artış görülmüş ancak birim ağırlık artışı kaybı azaltma yönünde etkili olmuştur.

Çizelge 4.14 Köpük beton numunelerin ultrases geçiş hızı donma çözülme öncesi ve sonrası değerleri.

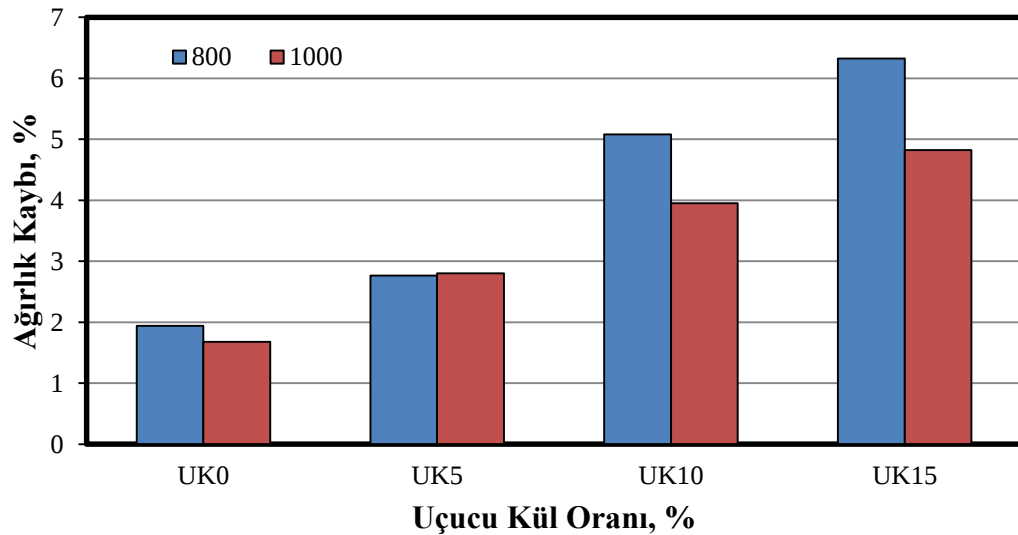
Seri No	Kür Süresi (Gün)	Donma Çözülme Öncesi Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Donma Çözülme Sonrası Ultrases Geçiş Hızı (m/s)	Ultrases Geçiş Hızı Kaybı (%)
800UK0	90	2388	2350	1.59
800UK5		2421	2356	2.68
800UK10		2491	2369	4.90
800UK15		2512	2372	5.57
1000UK0	90	2503	2470	1.32
1000UK5		2544	2483	2.40
1000UK10		2682	2581	3.77
1000UK15		2696	2568	4.75

Donma çözülme sonrası basınç dayanımı verileri Çizelge 4.15’de verilmiştir. Burada 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip serilerin 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip serilere göre basınç dayanımlarında daha az kayıplar olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek kayıp 800UK15 serisinde % 11.56 ile elde edilirken en düşük kayıp ise % 6.31 ile 1000UK0 serisinde elde edilmiştir.

Çizelge 4.15 Köpük beton numunelerin basınç dayanımı donma çözülme öncesi ve sonrası değerleri.

Seri No	Kür Süresi (Gün)	Donma Çözülme Öncesi Basınç Dayanımı (MPa)	Donma Çözülme Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı Kaybı (%)
800UK0	90	5.62	5.24	6.76
800UK5		5.70	5.21	8.61
800UK10		5.97	5.32	10.89
800UK15		5.81	5.14	11.56
1000UK0	90	8.17	7.65	6.31
1000UK5		8.45	7.95	7.14
1000UK10		9.64	9.06	8.47
1000UK15		8.41	8.07	9.49

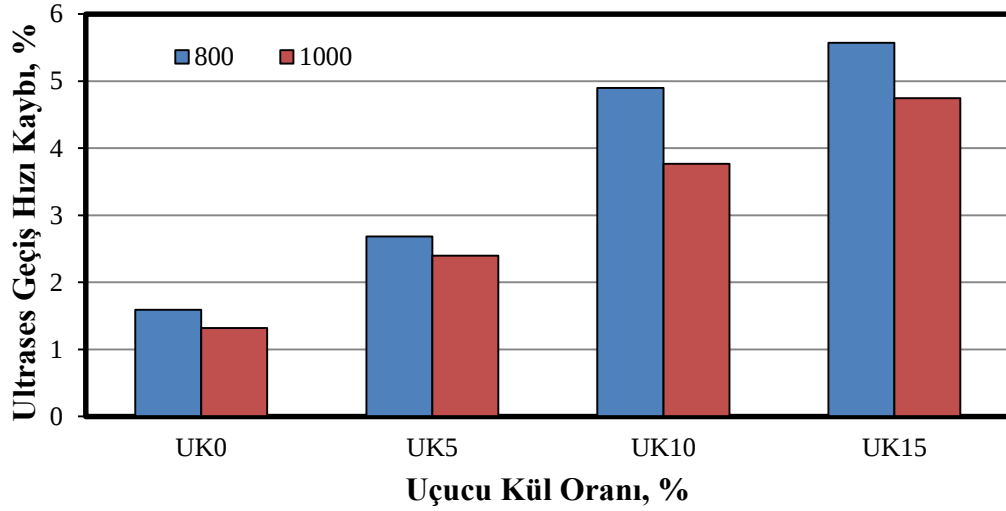
Şekil 4.32'ye göre en düşük ağırlık kaybı 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip olan kontrol serisinde olup diğer serilerde ağırlık kaybında artışlar görülmüştür. % 5 uçucu kül katkılı seriler için her iki birim ağırlık sınıfında da yaklaşık değerler elde edilmesine rağmen bünyedeki uçucu kül oranı arttıkça 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip serilerdeki ağırlık kaybında 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip serilere göre bir azalma kaydedilmiştir.



Şekil 4.32 Ağırlık kaybının uçucu kül oranına göre değişimi.

Şekil 4.33'e göre en düşük ultrases geçiş hızı kaybı 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip olan kontrol serisinde olup diğer serilerde ağırlık kaybında artışlar görülmüştür.

Serilerde uçucu kül artışına bağlı olarak kayıplarda artışlar görülmüş ancak yoğunluk artışına bağlı olarak donma çözülme sonrası kayıplarda azalmalar kaydedilmiştir.

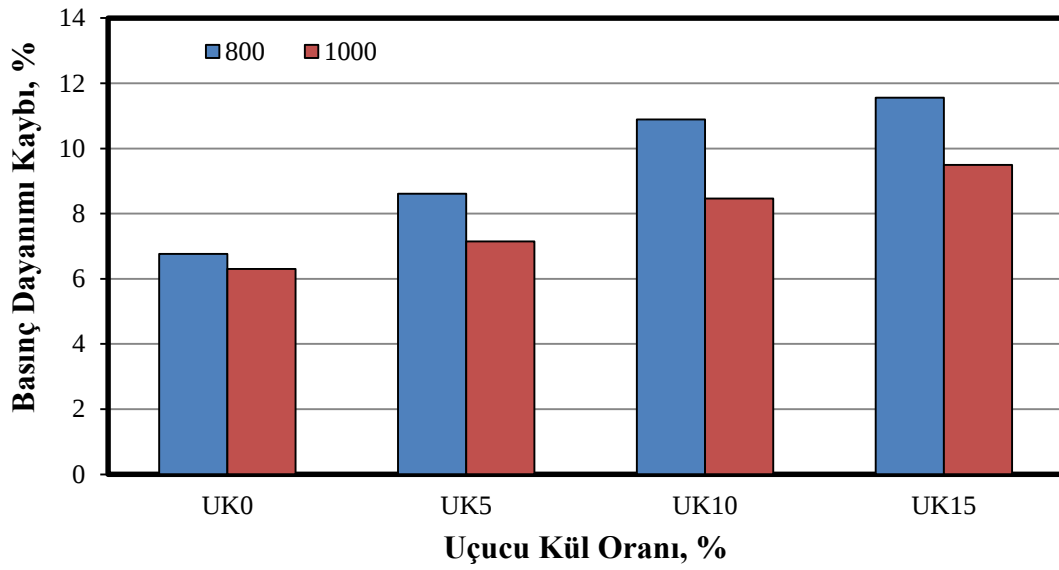


Şekil 4.33 Ultrases geçiş hızının uçucu kül oranına göre değişimi.

Zhang vd. (2024)'nin yaptığı çalışmada artan yoğunlukla birlikte çimento içeriğinin artmasına bağlı olarak gözenekliliğin azalmasıyla basınç dayanımında kaybın daha az olduğu belirlenmiştir. Kayıplar sırasıyla 800 kg/m³ ve 900 kg/m³ için % 7.73 ve % 6.89 olarak elde edilmiştir.

Şekil 4.34'e göre kontrol serisi basınç dayanımları incelendiğinde oluşan kaybın diğer serilere göre oransal olarak daha düşük olduğu gözlenmiştir. Ancak karışıma giren uçucu kül artışıyla birlikte basınç dayanımlarında düşme görüldüğü tespit edilmiştir.

Buna neden olarak donma çözülme çevrimleri sırasında numunelerin suya daha fazla maruz kalması dolayısıyla köpük betonun içyapısının gevşemesine sebep oluşu, katkı olarak kullanılan uçucu külün sertliğinin bozulması ve çimento matrisi içerisindeki bağ dayanımının zayıflaması gösterilebilir.



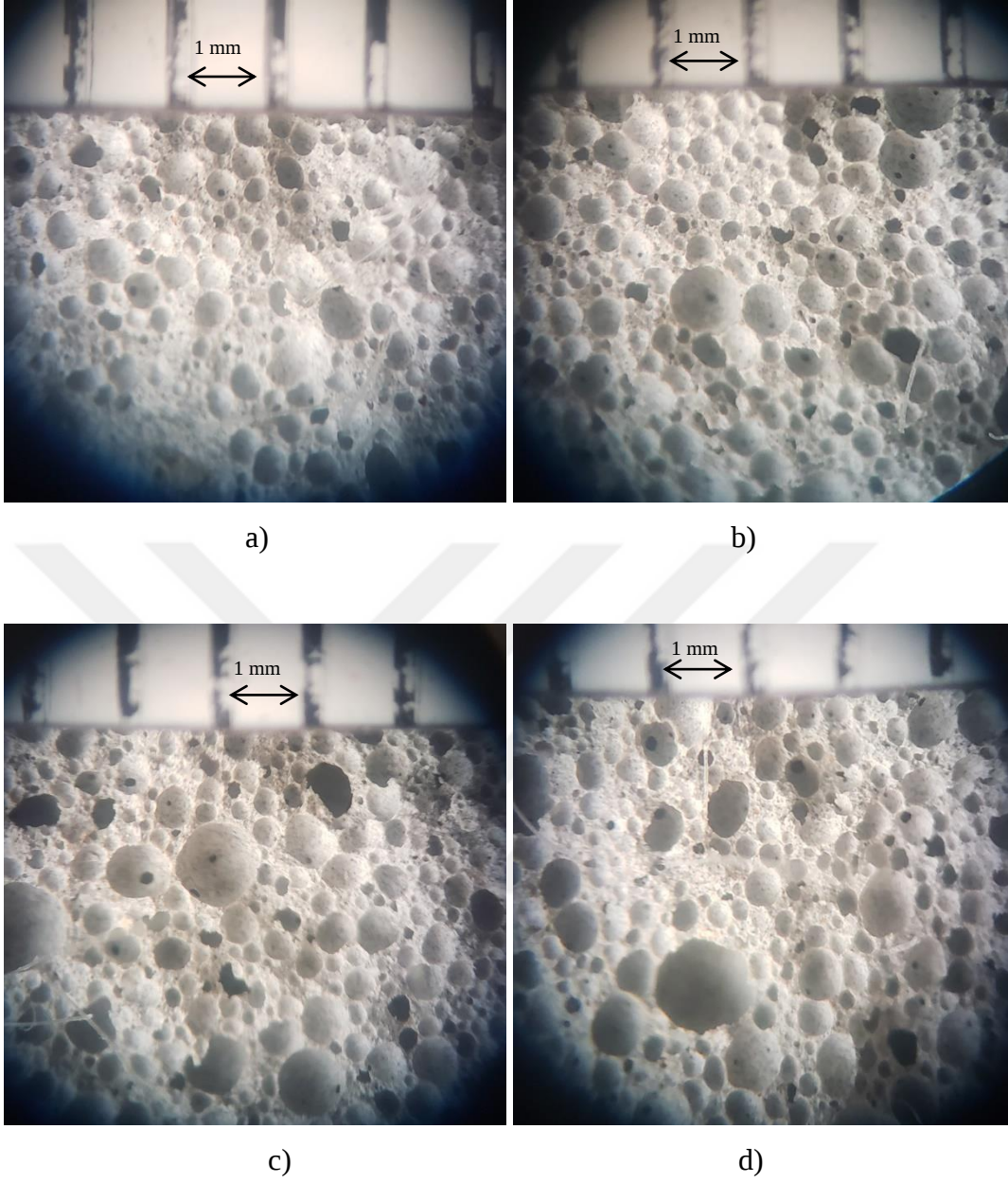
Şekil 4.34 Basınç dayanımı kaybının uçucu kül oranına göre değişimi.

4.5 Makroyapı Özellikleri

4.5.1 Polarizan Mikroskop ile Gözenek Boyutları Ölçümü

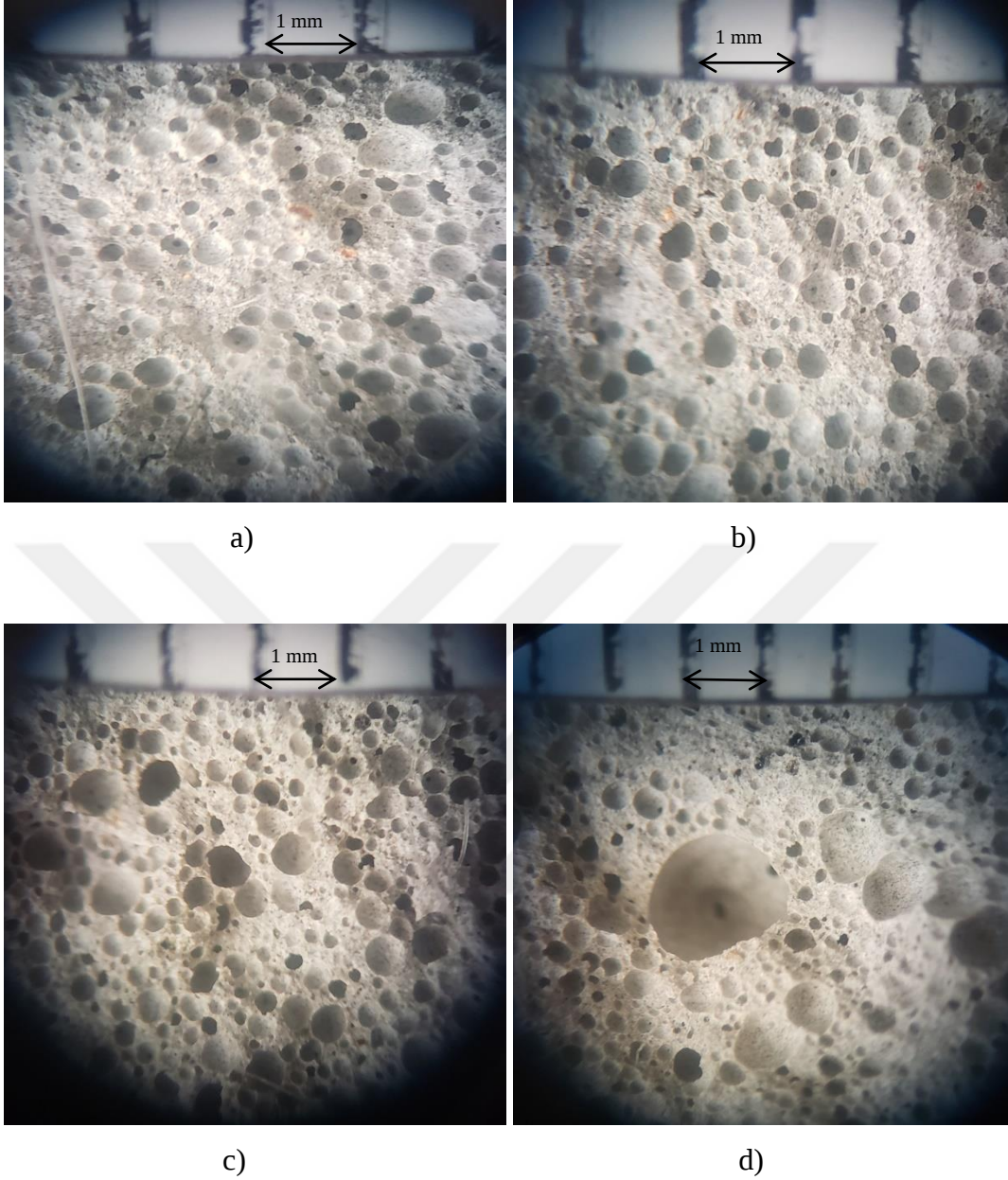
Çalışmada üretilen köpük beton örneklerinin gözenek çapı incelemeleri için polarizan mikroskop ile 20x büyütme oranında çekim ve incelemeler yapılmıştır. Farklı karışım oranlarına sahip numunelerde içyapılarda oluşan gözenek yapılarının ve boyutlarının gözlemlenmesi hedeflenmiştir.

Çekimler tüm seriler için yapılmıştır. Ölçüm için milimetrik cetvel kullanılmıştır.



Şekil 4.35 800 kg/m^3 birim ağırlığa ait gözenek çapı incelemeleri, a)800UK0, b) 800UK5, c) 800UK10, d) 800UK15.

Şekil 4.35 incelendiğinde en küçük gözenek çapının kontrol serisinde olduğu ve karışıma uçucu kül girmesiyle birlikte gözenek çaplarında kısmi bir büyüme başladığı görülmüştür. Gözeneklerin kapalı ve homojen dağılıma sahip olduğu, ağırlıklı ortalama çaplarının 200-400 mikron aralığında ve en büyük gözenek çapının 1 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.36 1000 kg/m³ birim ağırlığa ait gözenek çapı incelemeleri a)1000UK0, b)1000UK5, c)1000UK10, d)1000UK15.

Şekil 4.36 incelendiğinde en küçük gözenek çapının uçucu kül katkısı bulunmayan kontrol serisinde olduğu ve karışıma eklenen uçucu kül içeriğiyle gözenek çaplarında artış görülmüştür. % 15 uçucu kül katkısının olduğu 1000UK15 serisinde ise en geniş çaptaki gözenekler elde edilmiştir. Gözenek çaplarındaki artış su emme oranlarının artmasına sebep olmuş ve % 15 uçucu kül katkılı serilerde basınç dayanımlarında azalmaya neden olmuştur. Yapılan polarizan mikroskop çekimlerine göre üretilen her iki birim ağırlık serisinde de uçucu kül katkısının artmasıyla birlikte bünyelerde daha

büyük çapta gözenek oluşumları gözlenmesine rağmen % 5 ve % 10 uçucu kül eklenen serilerde basınç dayanımlarında artış görülmüş ve gözenek çaplarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir ancak % 15 uçucu kül ilave edilen serilerde ise çapların belirgin bir şekilde attığı ve bunun da basınç dayanımlarına olumsuz etki yaptığı elde edilen verilerle doğrulanmıştır.

Gözenegin şekli köpük betonun özelliklerini etkilememektedir (Görhan vd. 2008). Özçelik (2022) yaptığı tez çalışmasında beton mikroskobu ile köpük ajanı sayesinde beton içerisinde genişliği 2 mm'yi aşan düzensiz biçimde irili ufaklı ve farklı boyutlarda oluşan bağımsız kapalı gözenekler elde etmiştir.

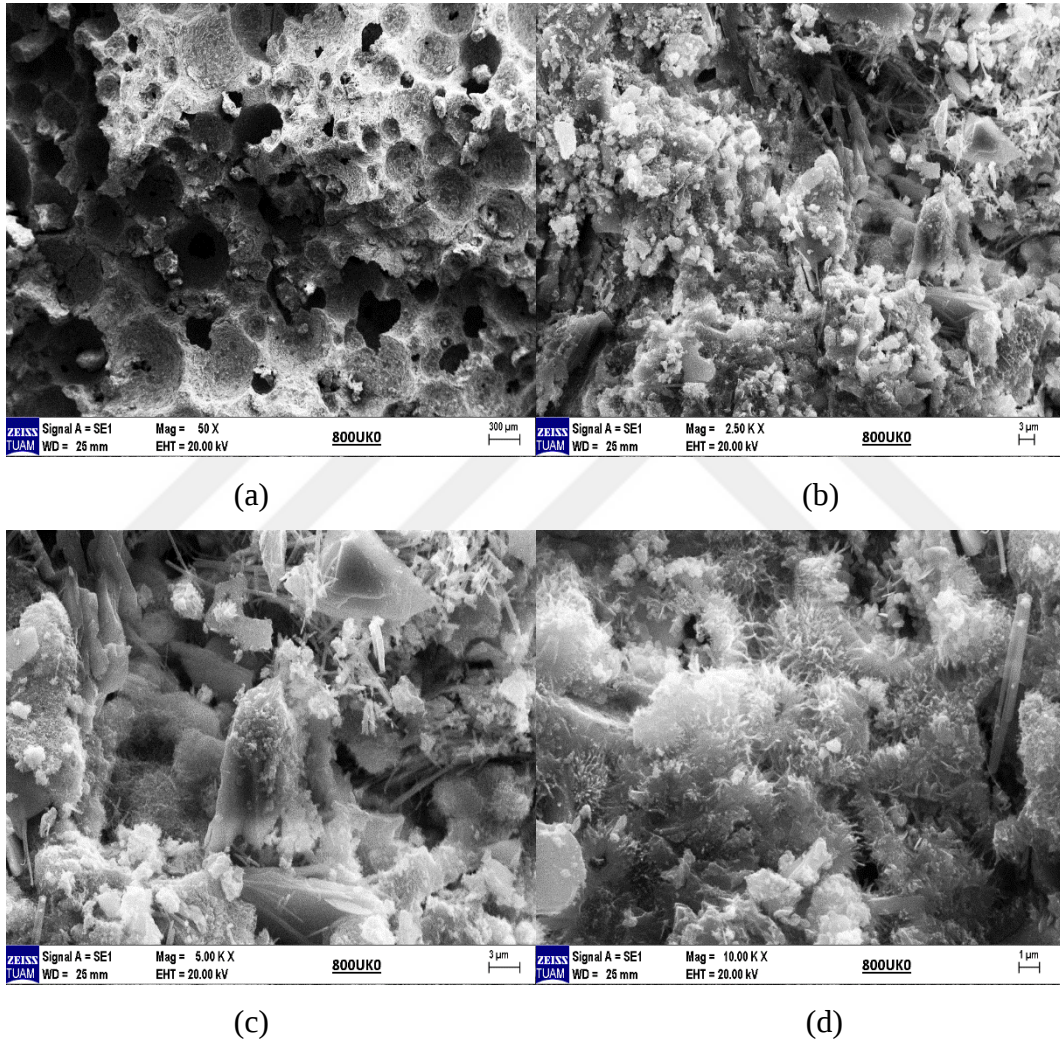
4.6 Mikroyapı Özellikleri

4.6.1 Taramalı Elektron Mikroskobu

Çalışmada üretilen köpük beton örneklerinin içyapı incelemeleri için SEM ile farklı büyütme oranlarında çekim ve incelemeler yapılmıştır. Farklı karışım oranlarına sahip numunelerde içyapılarda oluşan fazlar, gözenek yapılarının, hücre yapılarının ve boyutlarının gözlemlenmesi hedeflenmiştir. 800 kg/m³ ve 1000 kg/m³ kuru birim ağırlıklar için ayrı ayrı olmak üzere % 0 uçucu kül ve % 15 uçucu kül katkılı seriler için mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Katkıların bünyede oluşturduğu gözenek çapları, oluşan fazlar ve fazların görüntülenmesi hedeflenmiştir.

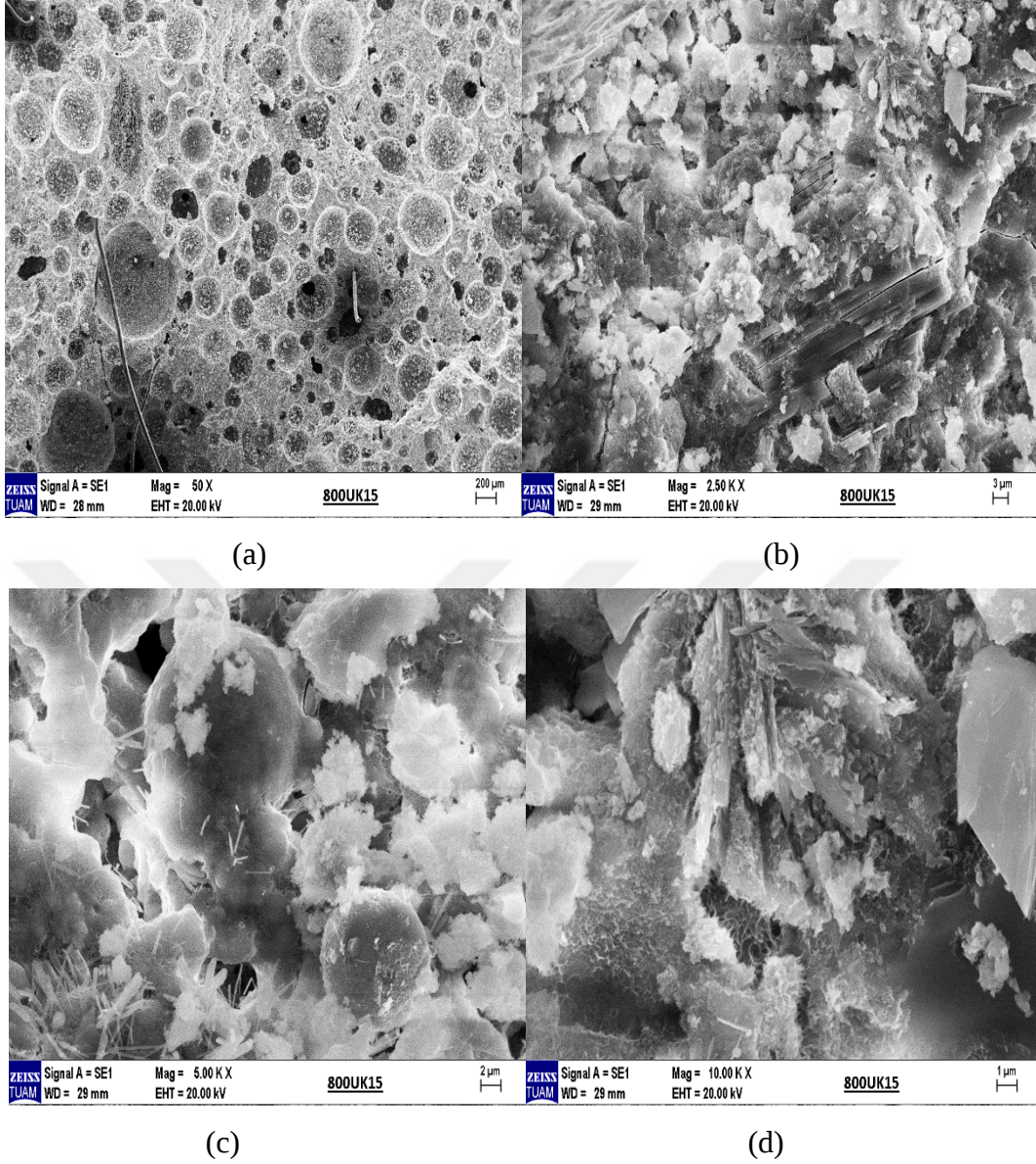
800 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı serilerde çimentoda bulunan C₂S ve C₃S fazlarının hidrate olması neticesinde oluşan CSH jelleri yoğun şekilde görülmüştür. İncelemelerde porlar içerisindeki çözeltide sülfat çözünürlüğünün yüksek olmasından dolayı etrenjit oluşumları dikkat çekmiştir. % 15 uçucu kül katkılı serilerde ise çimento hamurunda oluşan CSH jellerinin küresel şekle sahip uçucu kül tanelerini çevrelediği ve birbirine bağladığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül tanelerinin çimento hamuruyla sarıldığı ancak küresel yapılarını korumaya devam ettikleri tespit edilmiştir. % 15 uçucu kül katkılı serilerde uçucu kül bulunmayan kontrol serisine benzer oluşumlar görülmüş ise de henüz reaksiyona girmemiş ancak hidrate olmaya başlamış

uçucu kül taneleri görülmüştür. Bünyede oluşan CSH gelişimlerinde zayıflama görülmüştür. Görüntüler incelendiğinde elde edilen gözeneklerin boyutları birbirlerinden farklılık gösterirken dağılımlarının da düzenli gerçekleşmediği gözlenmiştir. Elde edilen gözenekler düşük birim ağırlıklı, akustik ve ısı yalıtımına sahip bir köpük betona özgü olacak şekilde numuneler elde edildiği görülmüştür. Birim ağırlığı 800 kg/m^3 olan 800UK0 numunelerin içyapı görüntüleri verilmiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37 800 kg/m^3 kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkılı seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.

Şekil 4.38’de 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip 800UK15 kodlu % 15 uçucu kül katkılı numunelerin içyapı görüntüleri verilmiştir.

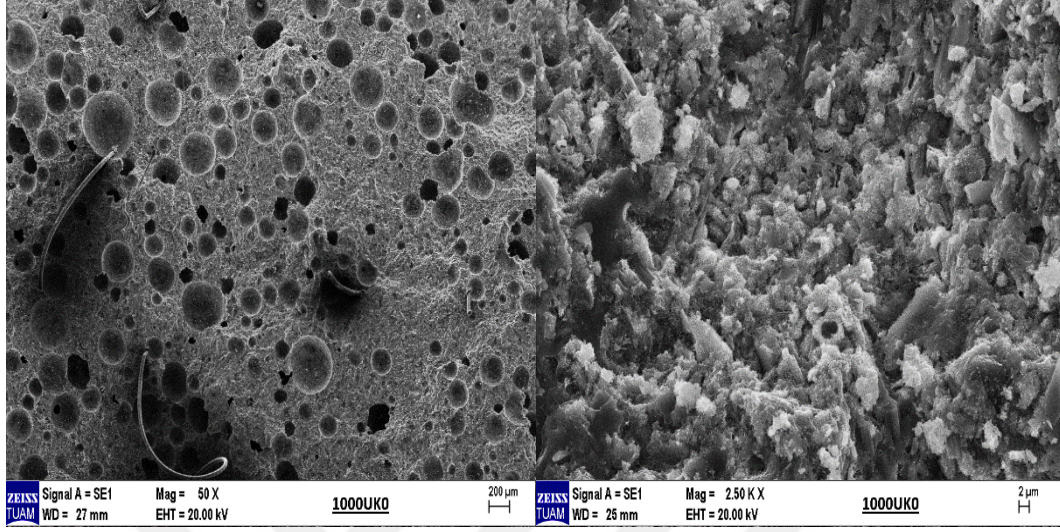


Şekil 4.38 800 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip %15 uçucu kül katkıli seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 1000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.

1000 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip % 0 uçucu kül katkıli serilerde yapılan incelemelerde 800 kg/m³'lük serilere karışma giren çimento miktarının artışı ve giren köpük miktarını azalmasından kaynaklı olarak daha az gözenek oluşumu gözlenmiştir.

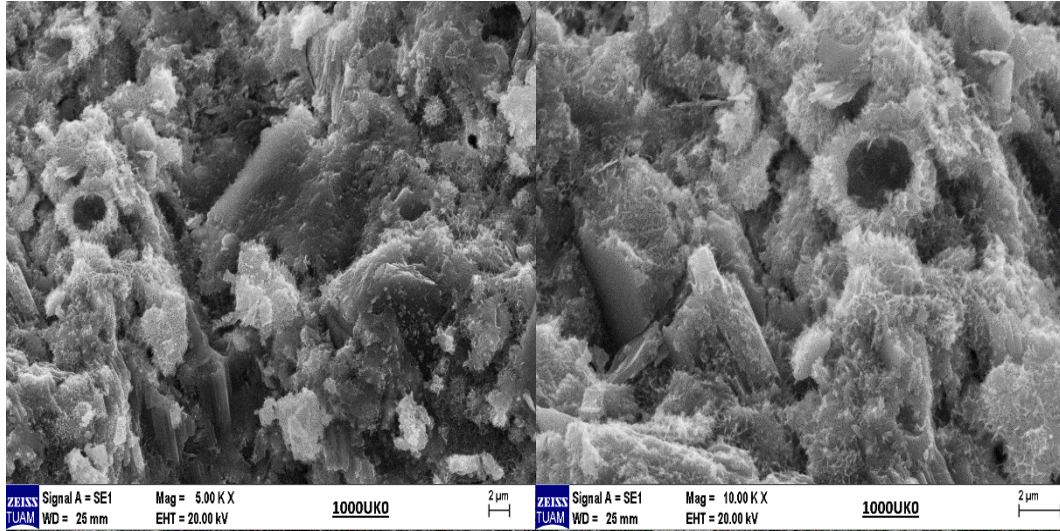
Alınan görüntülerde içerikte bulunan uçucu külün çözünüp CSH jeline dönüştüğü görülmüştür ve bu durumun da mukavemet artışını desteklediği sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.39’da 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip, % 0 uçucu kül içeren 1000UK0 kodlu kontrol serisine ait numunelerin içyapı görüntüleri verilmiştir.



(a)

(b)

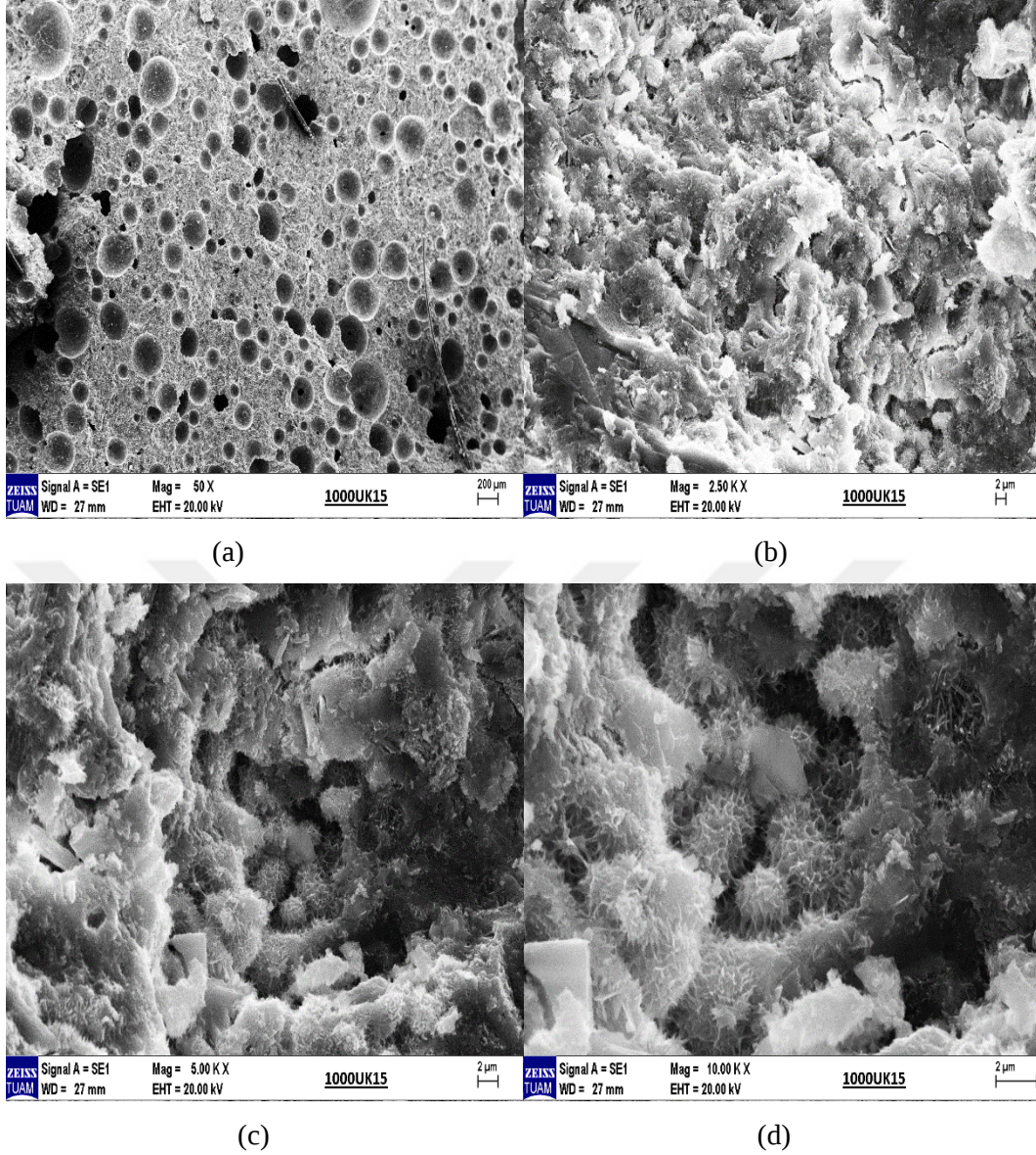


(c)

(d)

Şekil 4.39 1000 kg/m^3 kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkıli seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.

Şekil 4.40’da 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip 1000 UK15 kodlu % 15 uçucu kül içeren numunelerin içyapı görüntüleri verilmiştir.

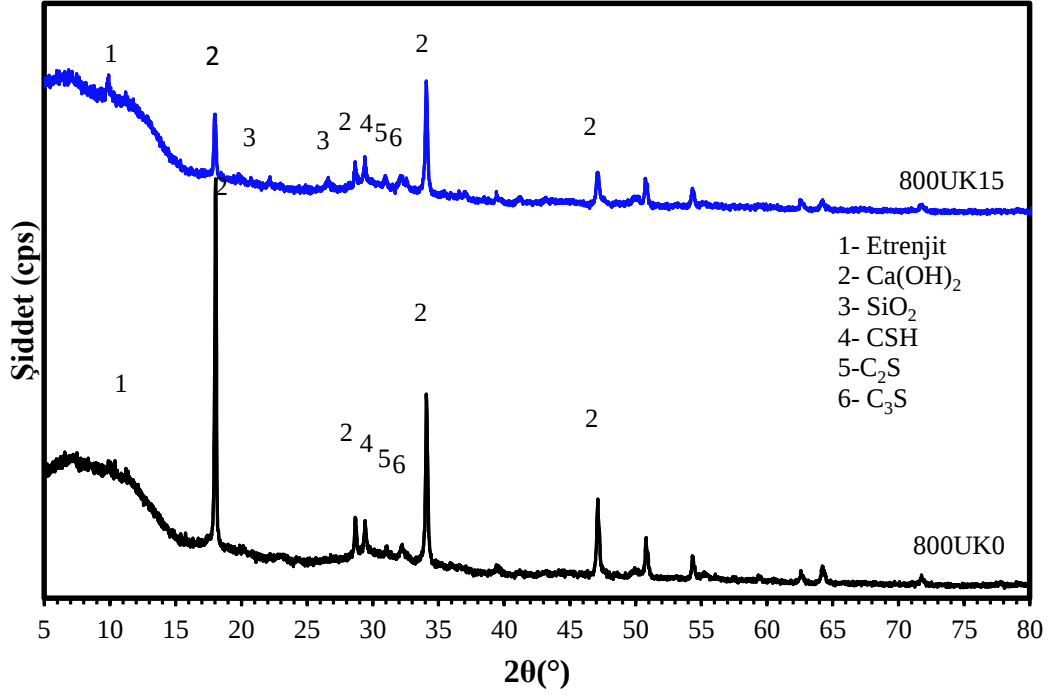


Şekil 4.40 1000 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip %15 uçucu kül katkıli seri için (a) 50 büyütme (b) 2500 büyütme (c) 5000 büyütme (d) 10000 büyütmedeki SEM içyapı görüntüleri.

4.6.2 XRD Analizi

Numunelerin basınç dayanımı testleri sona erdikten sonra köpük beton numunelerinden analiz için alınan parçalar havanda toz hale gelene kadar öğütülmüş ve analiz yapacak olan cihazın numune tutucusuna konarak kristal faz analizi yapılmıştır. XRD analizlerinde tespit edilen fazların şiddeti, numunenin alındığı yer ve numune homojenliğine bağlı olarak değişiklikler gösterebilmektedir.

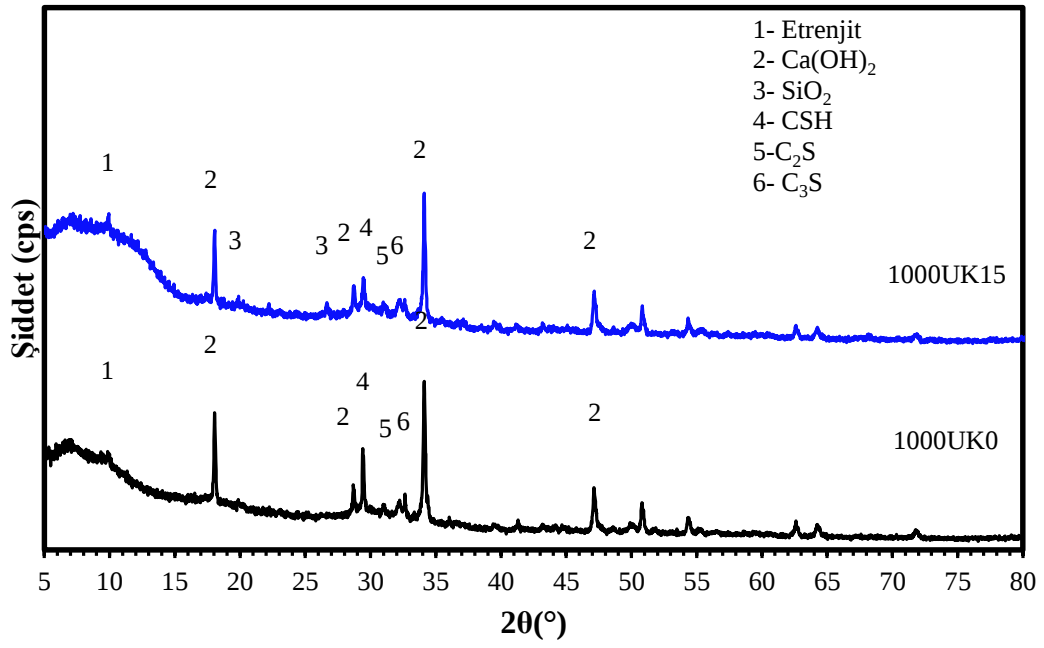
Şekil 4.41’de 800 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip, % 0 uçucu kül katkı ve % 15 uçucu kül katkı serilere ait XRD grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde her iki seride de benzer özellikler elde edilmiş olup çimento hidratasyonuna bağlı olarak gelişen CSH ve Ca(OH)₂ fazları ile birlikte hidratasyon reaksiyonunu henüz bitirmemiş olan C₂S ve C₃S fazlarına rastlanmıştır.



Şekil 4.41 800 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkı ve %15 uçucu kül katkı serilerin XRD analizleri.

Kuru birim ağırlığı 1000 kg/m³ olan 1000UK0 kodlu %0 uçucu kül katkı ve 1000UK15 kodlu % 15 uçucu kül katkı serilerin XRD analizleri incelendiğinde kontrol serisinde de uçucu kül katkı seride de benzer özellikler elde edilmiş olup çimento hidratasyonuna bağlı olarak gelişen CSH jelleri, C₂S ve C₃S fazları ve sülfat içerikli bileşikler ile çimento içeriğinde bulunan C₃A fazının reaksiyonu sonucu oluşan etrenjite rastlanmıştır.

Şekil 4.42’de 1000 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip, % 0 uçucu kül katkı ve % 15 uçucu kül katkı serilere ait XRD grafiği verilmiştir.



Şekil 4.42 1000 kg/m³ kuru birim ağırlığa sahip %0 uçucu kül katkı ve %15 uçucu kül katkı serilerinin XRD analizleri.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada piyasadaki benzerlerine göre daha hafif ve ısı yalıtım performansı geliştirilmiş köpük beton yapı elemanının teknolojik ve teknik olarak yapılabilirliği araştırılmıştır. Tez kapsamında ilk olarak oluşturulacak karışım reçeteleri için ön deneme çalışmaları yapılmış olup 800 kg/m^3 ve 1000 kg/m^3 kuru birim ağırlıklara sahip, çimento ve uçucu kül içeren karışım reçeteleri mutlak hacim yöntemine göre hazırlanmış ve bunlardan üretilen örnekler üzerinde deneysel çalışmalar yürütülerek nihai karışım reçeteleri optimize edilmiştir. Bu amaçla, üretimi düşünülen köpük beton panel yapı elemanı tasarlanmış ve temel olarak kullanılacak malzemelerin özellikleri, başlangıç karışım oranları belirlenmiştir. Üretim prosesi, uygulanacak test yöntemleri belirlenmiştir. Üretim sürecinde yürütülecek laboratuvar çalışmaları tespit edilmiştir. Karışım dizaynı ve bu süreçte yapılan laboratuvar çalışmalarıyla optimum üretim prosesi belirlenmiştir.

Duvar paneli üretimi için kalıplar yapılarak, çelik hasırdan donatı elemanlarının tesisi sağlanmıştır. Köpük beton deney örneklerinin üretildikten sonra örnekler üzerinde kuru birim ağırlık, rölatif uzunluk değişimi, su emme, ultrases geçiş hızı, kılcal su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, akustik ve ısı özelliklerine ilişkin test ve analizler yürütülerek elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve yorumları yapılarak fiziksel, mekanik ve fonksiyonel özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen deney verileri ile belirlenen örnekler üzerinde makro yapı (polarizan mikroskop) ve mikro yapı analizleri (SEM, XRD) yürütülmüştür.

Yapılan analiz ve testler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Numunelerin mekanik özellikleri köpük beton standartları ile uyum sağladığı ve standartların üzerinde değerler elde edilmiştir.

Yapılan deneylere göre;

800 kg/m³ köpük beton duvar panel örnekleri için taze birim ağırlığa göre kuru birim ağırlıklarda yaklaşık % 12 kayıp görülürken 1000 kg/m³ seriler için yaklaşık % 10 olarak gerçekleşmiştir. Buradan uçucu külün serilerdeki yüzdesinin artmasıyla (% 5, % 10 ve % 15) birlikte kuru birim ağırlık kaybında artışa neden olduğu anlaşılmıştır.

Rölatif uzunluk değişimleri 800 kg/m³ birim ağırlığa sahip serilerde içerikteki uçucu kül oranı arttıkça uzunluk değişimi azalmıştır. 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip numunelerde de uçucu kül ikame oranının artmasıyla birlikte rölatif uzunluk değişimi azalmıştır. Uçucu kül içermeyen kontrol serisine göre uzunluk değişimleri daha düşük bulunmuştur.

Kür süresi arttıkça numunelerin su emme değerlerinde düşme görülmüş fakat bünyedeki uçucu külün artışıyla birlikte su emme değerleri artmıştır. Birim ağırlığı yüksek olan serilere bakıldığında daha düşük su emme gerçekleşmiştir.

Kılcal su emme testlerinde içerikteki uçucu kül oranının artışıyla birlikte su emmelerde artış görülmesine rağmen kür süresinin artışıyla birlikte daha az su emme değerlerine elde edilmiştir. 1000 kg/m³ birim ağırlığa sahip serilerin, 800 kg/m³ birim ağırlıklı seriye göre daha düşük emme gerçekleştirdiği de görülmüştür. Ortalamalara bakıldığında uzun dönemde her iki birim ağırlık için de 0,02 mm/s^{0,5} elde edilmiştir.

Yüksek birim ağırlığa sahip serilerin ultrases geçiş hızlarında artış gerçekleşmiş ve kür süreleri arttıkça yükseliş sürmüştür. Yüksek birim ağırlığa sahip serilerde düşük birim ağırlığa göre artan bir geçiş hızı eğilimi görülmüştür. 28 günlük serilerde 800 kg/m³ seriler için ortalama 2417 m/s elde edilirken 1000 kg/m³ lük serilerde 2552 m/s elde edilmiştir.

Basınç dayanımlarında kontrol serilerinin en düşük dayanıma sahip olduğu, uçucu kül katkılı serilerde mukavemet artışı kaydedildiği ve en yüksek mukavemet değerlerinin %10 uçucu kül katkılı serilerde elde edildiği görülmüştür. Köpük beton kür süreleri

dikkate alındığında tüm serilerde doğrusal bir artış mukavemet artışı gerçekleştiği görülmüştür. 28 gün kür edilen numunelerde 800 kg/m^3 seriler için ortalama 5.50 MPa basınç dayanımı elde edilirken, 1000 kg/m^3 lük serilerde ortalama 6.87 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Karışıma giren uçucu kül miktarı, dozaj, köpük oranı ve yoğunluğu, S/B oranı, kür süresi gibi etkenlerin basınç dayanımı gelişiminde önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Donatısız numunelerin eğilme dayanımı sonuçlarına göre tüm serilerde uçucu kül oranı arttıkça eğilme dayanımlarında da artış görülmüştür. Donatılı olarak üretilen ve 90 gün kür yapılan duvar panellerinde ise uçucu kül oranı artışıyla birlikte donatısız numunelere benzer şekilde eğilme dayanımlarında artış görülmüştür.

Zamana bağlı yüzey sıcaklığı geçiş simülasyon deneyi sonuçlarına göre ilk yüzey sıcaklığı ölçümü oda sıcaklığında yapılmıştır, püzmüzle 5 dakika süresinde sıcaklık verilen 5 cm kalınlığa sahip plakanın arka yüzeyinde yapılan ölçümde 800 kg/m^3 birim ağırlığa sahip kontrol serisi için % 1.24 sıcaklık artışı gerçekleşirken %15 uçucu kül katkılı seride ise % 3.24 sıcaklık artışı gerçekleşmiştir. 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip seriler için en düşük yüzey sıcaklık artışı kontrol serisinde %1.53 ile elde edilmiş olup % 15 uçucu kül katkılı seride ise % 3.42 olarak gerçekleşmiştir. Uçucu kül yüzdesi artışıyla birlikte yüzeyden geçen sıcaklıklarda artış görülmüştür. TS 13501-1 Yapı mamullerinin yangın karşısındaki davranış sınıfları, yer döşemeleri hariç A1 sınıfı şartlarına göre sıcaklık değişimi 30°C 'den düşük olmuştur, kütle kaybı oluşmamış ve yanma gerçekleşmemiştir.

Akustik özellik sonuçlarına göre en yüksek ses yutma değerleri kontrol serilerinde elde dilmiş olup uçucu kül oranındaki artış ve köpük miktarındaki azalışla birlikte ses yutma değerlerinde azalma görülmüştür.

Donma çözülme deneyi sonrası yapılan testlerde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve basınç mukavemeti değerlerinde donma çözülme deneyi öncesine göre azalma görülmüştür. Bu çalışmada 800 kg/m^3 için uçucu kül bulunmayan kontrol serisinde % 6.76 ve 1000 kg/m^3 için % 6.31 olarak basınç dayanımı kaybı gerçekleşmiştir.

Karışıma ikame edilen uçucu kül oranı arttırıldığında donma çözünme sonrası basınç dayanımı kayıplarında artış görülmüştür.

Polarizan mikroskopla yapılan gözenek çapı ölçümlerinde gözeneklerin genel olarak homojen dağıldığı ve ağırlıklı ortalamanın 200-400 mikron aralığında olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül katkı oranının artmasıyla en büyük gözenek çapının 1 mm'ye kadar arttığı görülmüştür. Bünyede gözeneklerin kapalı ve homojen dağıldığı belirlenmiştir. Gözeneklerin birleşmesi ile gözenek hacminin büyümesi sonucu daha büyük boşluklar oluşup daha büyük gözenek dağılımı meydana gelerek mukavemette kısmi düşme gerçekleşmektedir.

Dünyada her yıl milyonlarca ton uçucu kül açığa çıkmakta, bu küller doğada serbest şekilde depolanmaktadır ve rüzgar, yağmur gibi doğa olayları neticesinde yeraltı sularına karışmakta ve çevreye dağılarak doğal çevrenin kirlenmesine yol açabilmektedir. Ayrıca depolanabilmeleri için çok geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Beton üretiminde uçucu külün çimento ile belli oranlarda ikamesi sonucu ekonomik ve sürdürülebilir üretim imkanı sunulabilmektedir.

Uçucu kül katkılı yapı malzemelerinin kullanım alanlarının artması sayesinde küllerin biriktirilme ve depolama sorunları azalacak, çevreye vermiş olduğu zararlar en aza indirgenmiş olacaktır. Uçucu külün atık bir malzeme olarak kullanımı karbon salınımını azaltacak, üretilen yapı malzemesinin maliyetini düşürecek ve çimentonun daha az kullanılması ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada köpük beton duvar panelleri üretiminde kullanılan çimentonun azaltılarak, ikame olarak uçucu kül katkısının etkileri araştırılmış olup, elde edilen veriler ışığında 800 kg/m^3 ve 1000 kg/m^3 birim ağırlığa sahip köpük betonlar için % 5, % 10 ve % 15 uçucu kül katkısının duvar panel üretiminde standartları sağlayacak düzeyde üretim yapılabilmesine imkan sağladığı sonucuna ulaşılmış ve uçucu kül katkılı köpük beton duvar panelleri üretiminin yapılabileceği belirlenmiştir.

6. KAYNAKLAR

- ACI 523.3r-14 Guide For Cellular Concretes Above 50 Lb/Ft³ (800 kg/m³).
- ASTM C618, 2001, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as A Mineral Admixture in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Agarwal S K, Masood I, Malhotra S K, 2000, Compatibility of Superplasticizers with Different Cements, Construction and Building materials, 14(5), 253-259.
- Akdere İ, 2023, Kenevir Lifinin Köpük Beton Üretiminde Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Aldridge D, Dhir K R, Newlands M D, McCarthy A, 2005, Introduction to Foamed Concrete What, Why and How?, Use of Foamed Concrete in Construction. pp 1-14, London: Thomas Telford.
- Awana M, Kumar C, 2017, Cellular Lightweight Concrete, International Journal of Innovative Research in Science and Engineering, Vol. No3, Issue 04, 673-678.
- Banfill P F G, 2003, The Rheology of Fresh Cement and Concrete – A review. Proceeding of 11th International Cement Chemistry Congress, Durban.
- Baradan B, Yazıcı H, Aydın S, 2012, Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Basiurski J, 2000, Foamed concrete for void filling, insulation and construction, One day awareness seminar 'Foamed concrete: properties, Applications and Potential', University of Dundee, Scotland, pp. 42-52.
- Başpınar S M, Aytekin M, 2019, Alçı Esaslı Mineral İşlem Atığının Ticari Alçı Bünyelerde Kullanım Şartlarının Araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19, 834-842.
- Bayraktar O Y, Kaplan G, Gencel O, Benli A, Sutcu M, 2021, Physico-Mechanical, Durability and Thermal Properties of Basalt Fiber Reinforced Foamed Concrete Containing Waste Marble Powder and Slag, Construction and Building Materials, 288.

- Bekaroğlu M, 2012, Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri ve Teknik Parametrelerinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Beningfield N, Gaimster R, Griffin P, 2015, Investigation into the Air Void Characteristics of Foamed Concrete, in: Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities: Proceeding of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK, Cement Combinations for the Durable Concrete, vol. 6(1), 51.
- Brady K C, Jones, M R, Watts, G R, 2001, Specification for Foamed Concrete, Application Guide AG39: TRL Limited.
- Bryant M, 1990, How to Make Concrete That Will Be Immune to the Effects of Freezing and Thawing, Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI SP-122, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.
- Byun K J, Song H W, 1998, Park SS. Development of Structural Lightweight Foamed Concrete Using Polymer Foam Agent. ICPIC-98.
- Chen Y, 2023, Experimental Study on Application Performance of Foamed Concrete Prepared Based on a Colloidal NanoSiO₂-Stabilized Foam, Construction and Building Materials, Volume 409, 134012.
- Bodur B, Bayraktar O Y, Kaplan G, 2021, Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Kullanımının İncelenmesi. I. Uluslararası Mühendislik ve Mimarlık Kongresi, İstanbul, 338-361.
- Davraz M, Kılınçarslan, Ş, Kuru M, 2015, Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım Ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal beton kongresi, Antalya, 93-102.
- Dede H, 2019, Köpük Beton Üretiminde Genleştirme Yönteminin Deneysel Yöntemlerle Optimize Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Demir İ, 2014, Köpük Betonda Rötire Çatlaklarının Engellenmesi Hakkında Teknik Rapor, Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

- Ding X, Yu J, Lin J, Chen Z, Li J, 2024, Experimental Investigations of Prefabricated Lightweight Self-Insulating Foamed Concrete Wall Panels, Structures, Volume 61,1-10.
- Dudhe P, Dwivedi N, Mundane A, Bopche V, Dabhekar K, Khedikar I, Nirwan N, 2023, Study of lightweight foamed concrete with the addition of industrial waste, Materialstoday: Proceedings, 1-7.
- Erdoğan T Y, 2013, Beton, 4. Baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Ankara.
- Ezici M, 2016, Farklı Koşullarda Dökülen Betonlarda Vibrasyon ve Kür Koşullarının Değişiminin Beton Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adıyaman.
- Fadila R, Suleiman M Z, Noordin N Md, 2008, Paper Fiber Reinforced Foam Concrete Wall Paneling System, 2nd International Conference on Built Environment in Developing Countries, 527-540.
- Falliano D, Domanico D D, Ricciardi G, Gugliandolo E, 2019, Compressive and Flexural Strength of Fiber-Reinforced Foamed Concrete: Effect of Fiber Content, Curing Conditions and Dry Density, Construction and Building Materials 198:479-493.
- Feng S, Gao Y, Xiao H, Xue C, 2024, Influence of Fibers and Bubble Structure on Thermal Conductivity and Mechanical Performances of Foam Concrete, Construction and Building Materials, Volume 445,1-16.
- Gelim K A K, 2011, Mechanical And Physical Properties of Fly Ash Foamed Concrete, Master Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University Tun Hussein Onn, Malaysia.
- Görhan G, Kahraman E, Başpınar M S, Demir İ, 2008, Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2008 (2) 85 -94.
- Gültekin A B, Kaplan G, 2010, The Investigation of Fly Ash Usage in Terms of Environmental And Social Effects in Construction Sector, International Sustainable Buildings Symposium, Ankara, No1, 193-203.

- Güven G, 2024, Soma Termik Santrali Uçucu Küllerinden Nadir Toprak Elementlerinin (Nte) Kazanımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Cevher Hazırlama Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Hamidah M S, Azmi I, Ruslan M R A, Kartini K, Fadhil N M, 2005, Optimisation of Foamed Concrete Mix of Different Sand-Cement Ratio and Curing Conditions. In Use of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK, Thomas Telford Publishing, pp. 37-44.
- Hanehara S, Yamada K, 2008, Rheology and Early Age Properties of Cement Systems. Cement and Concrete Research, 38(2), pp. 175-195.
- He Y, Gao M, Zhao H, Zhao Y, 2019, Behaviour of Foam Concrete under Impact Loading Based on SHPB Experiments, Hindawi Shock and Vibration Volume 2019, 1-13.
- Ibrahim W, Haziman M, Jamaluddin N, Irwan J M, Ramadhansyah P J, Suraya Hani A, 2014, Compressive and Flexural Strength of Foamed Concrete Containing Polyolefin Fibers, Advanced Materials Research ,911, 489-493.
- Işıldar N, 2003, Silika Esaslı Katkıların Otoklavlanmış Köpük Beton Mühendislik Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Jennings H M, Kumar A, Sant G, 2015, Quantitative Discrimination of the Nano-Pore-Structure of Cement Paste During Drying: New Insights from Water Sorption Isotherms, Cement and Concrete Research, V:796, 27-36.
- Jones M R, McCarthy A, 2005, Utilizing Unprocessed Low-Lime Coal Fly Ash in Foamed Concrete. Fuel, 84(11), pp. 1398-1409.
- Jones M R, McCarthy A, 2005, Behavior and Assessment of Foamed Concrete for Construction Application, In Proceeding of the International Conference on the use of Foamed Concrete in Construction, a, p. 61-88
- Jones M R, McCarthy A, 2005, Preliminary Views on the Potential of Foamed Concrete as a Structural Material. Magazine of Concrete Research, b, 57(1), pp. 21-31.

- Karahan G, Erşahin S, 2016, Jips; Özellikleri, Çevresel Davranışları ve Toprak Islah Maddesi Olarak Kullanımı, *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*, 2 (1-2), 45-53.
- Karl S, Worner J D, 1993, Foamed Concrete-Mixing And Workability. In: Bartos PJM, Editor. *Special Concrete-Workability and Mixing*. London: E&FN Spon; 1993. p. 217–24.
- Kearsley E P, 1999, Just Foamed Concrete – An Overview. *Proceedings Creating with Concrete (Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction)*, Dundee, UK, pp. 225 - 237.
- Kearsley E P, Wainwright P J, 2001, Porosity and Permeability of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(5),2001a, pp. 805-812.
- Khayat K H, Assaad J, 2002, Air-void stability in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, 4: 408-416.
- Kılınçarslan Ş, Tuzlak F, 2018, Uçucu Kül Katkılı Köpük Betonların Dayanım ve Isı İletkenlik Özelliklerinin İncelenmesi, *International Journal of Sustainable Engineering and Technology* Sayı: 2, Cilt: 1, (2018), 1-5.
- Konuk H, 2003, Hafif Agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koru M, 2017, Köpük Betonun Yoğunluk ve Sıcaklığa Bağlı Isıl İletkenlik Katsayısının Isı Akış Ölçer Yöntemiyle Belirlenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 21, Sayı 2, 614-622.
- Kumlutaş D, Tavman H İ, 2003, “Alüminyum Oksit Tane Katkılı Polietilen Matriksli Kompozitlerin Isı İletim Katsayısı” *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt:5 Sayı:2 s.19-25.
- Kuzielova E, Palou T M, 2016, Effect of Activated Foaming Agent on the Foam Concrete Properties, *Construction and Building Materials* 125:998-1004.
- Li Z C, Zhang L, Liang X, Xiao B, Tam W Y V, Lai X, Chen Z, 2022, Advances in the research of building energy saving, *Energy & Buildings*, 111556.
- Liu J, Zhao J, Zhao Y, Zhang Y, Zhang H, Zhang H, Tian G, 2023, Resource Utilization

- of Solid Waste From Steel Industries in Cement-Based Cementitious Materials: Mechanical Properties, Hydration Behaviors, And Environmental impact. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109882.
- Liu X, Huang F, Zheng A, 2024, Investigation of Foam Concrete's Mechanical Properties and Multi-Scale Damage Evolution Characteristics Under Uniaxial Loading, *Construction and Building Materials*, Volume 430, 1-15.
- Luukkonen T, Abdollahnejad Z, Yliniemi J, Kinnunen P, Illikainen M, 2018, One-Part Alkali-Activated Materials: A Review, *Cement and Concrete Research*, 103, 21–34.
- Lv X S, Cao W, Yio M H N, Lu J, She W, Poon C S, 2023, 3D Superhydrophobic Lightweight Foam Concrete Designed Via In-Situ Foaming and Self-Assembled Silicone Microfilms, *Chemical Engineering Journal*, Volume 478, 147390.
- Lv X, Cao W, Yio M, Ji W, Lu J, She W, Poon C S, 2024, High-Performance Lightweight Foam Concrete Enabled by Compositing Ultra-Stable Hydrophobic Aqueous Foam, *Cement and Concrete Composites*, Volume 152, 1-15.
- Mathapati M, Amate K, Prasad C D, Jayavardhana M L, Raju T H, 2022, A Review on Fly Ash Utilization, *Materialstoday:Proceeding*, Volume 50, Part 5, 1535-1540.
- McCarthy A, 2004, Thermally Insulating Foundations and Ground Slabs for Sustainable Housing Using Foamed Concrete, PhD Thesis. University of Dundee.
- Mehdizadeh H, Wu Y, Mo K H, Ling T C, 2023, Evaluation of Carbonation Conversion of Recycled Concrete Fines Using High-Temperature CO₂: Reaction Kinetics and Statistical Method for Parameters Optimization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109796.
- Mohammad M, 2011, Development of Foamed Concrete Enabling and Supporting Design, PHD, Division of Civil Engineering, University of Dundee.
- Mohammed H J, Hamad A J, 2014, Materials, Properties and Application Review of Lightweight Concrete, *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 37, 10-15.
- Mohammed J H, Hamad A J, 2014, A Classification of Lightweight Concrete:

- Materials, Properties and Application Review, International Journal of Advanced Engineering Applications, Vol.7, Iss.1, pp.52-57.
- Mydin M A O, Sor N H, Bahrami A, Dulaimi A, Özkılıç Y O, Althoey F, Jagadesh P, Isleem H F, Tawfik A T, 2024, Residual Durability, Mechanical, and Microstructural Properties of Foamed Concrete Subjected to Various Elevated Temperatures, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 55,1-20.
- Nambiar E K K, Ramamurthy K, 2007, Air-Void Characterisation of Foam Concrete, Cement and Concrete Research 37, 2007a, 221–230.
- Nambiar E K K, Ramamurthy K, 2007, Sorption Characteristics of Foam Concrete, Cement and Concrete Research 37, 2007b, pp. 1341–1347.
- Nambiar E K K, Ramamurthy K, 2006, Models Relating Mixture Composition to the Density and Strength of Foam Concrete Using Response Surface Methodology, Cement and Concrete Composites, 28(9), (2006b) 752-760.
- Nehdi M, Djebbar Y, Khan A, 2001, Neural Network Model for Preformed Foam Cellular Concrete. ACI Mater J;98:402–9.
- Neville A M, 1995, Advanced Concrete Technology, John Newman, B S Choo.
- Nergiz V, 2007, Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Othuman A Md, Wang Y C, 2011, Elevated-Temperature Thermal Properties of Lightweight Foamed Concrete, Construction and Building Materials 25, 705–716. p. 75–82.
- Ören O H, Gençel O, 2017, Köpük Beton, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5, 129-136.
- Özçelik Y, 2022, İnşaat Yıkıntı Atıklarının Köpük Beton Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s, Ankara.
- Özçep F, Karabulut S, Özgüven B, Sanlı O, 2012, Tahribatsız Test Yöntemleri ve

Ultrasonik Hız Ölçümleri, Jeofizik Bülteni, İstanbul Üniversitesi Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Syf: 11-24, İstanbul.

Özden A V, 2010, Betonun Basınç Ve Çekme Dayanımı İle Elastisite Modülü Arasındaki İlişkiler Üzerine Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

Qubro A K, Saggaff, Saloma, 2023, The Flexural Strenght of Green Foamed Concrete with Polypropylene Fiber, 3rd International Conference on Disaster Management, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1173, 1-9.

Raj A, Sathyan, D, Mini, K. M, 2019, Physical and Functional Characteristics of Foam Concrete: A review, Construction and Building Materials, 221, 787-799.

Ramamurthy K, Nambiar E, Ranjani G, 2009, A classification of studies on properties of foam concrete. Cem Concrete Compos;31(6):388–96.

Revilla-Cuesta V, Fiol F, Perumal P, Ortega-López V, Manso J M, 2022, Using Recycled Aggregate Concrete at a Precast-Concrete Plant: A Multi-Criteria Company-Oriented Feasibility Study. Journal of Cleaner Production, 373, 133873.

Rodhia R, Sahdeo S K, Kumar B, 2024, Optimizing Foaming Agent Concentration and Recycled Fine Aggregate Content to Enhance Mechanical and Durable Properties of Foam Concrete Mixes, Journal of Building Engineering Volume 97, 1-25.

Roussel N, Le Roy R, 2005, The Marsh Cone: A Test or a Rheological Apparatus, Cement and Concrete Research, 35, 823-830.

Sahinagic-Isovic M, Markovski G, Cecez M, 2012, Shrinkage Strain of Concrete - Causes and Types, Journal of the Association of Civil Engineers, Gradevinar 64, 9, 727-734.

Santos P, Silva L S, 2017. Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings. Energy Efficient Buildings, 35, 180-191.

Shahidan S, Amnuddin E, Noor K M, Raihan N İ, Hanna R, Bahari N A S, 2017, Potantial of Hollow Glass Microsphere as Cement Replacement for Lightweight

- Foam Concrete on Thermal Insulation Performance, ISCEEE, Matec Web of Conferences, 103,1-9.
- Shang X, Qu N, Li J, 2022, Development And Functional Characteristics Of Novel Foam Concrete. Construction And Building Materials, 324, 126666.
- Shankar A N, Chopade S, Srinivas R, Mishra K N, Eftikhaar H K, Sethi G, Singh B, 2023, Physical and mechanical properties of foamed concrete, a literature review, Materialstoday: Proceedings, 1-8.
- Shi X, Ning B, Na F, Zhao W, Zhang C, 2024, Study on Properties of Re-Dispersible Latex Powder and Polypropylene Fiber-Reinforced Lightweight Foam Concrete, Journal of Building Engineering, Volume 95, 1-14.
- Siram K K B, 2012, Cellular Light-Weight Concrete Blocks as a Replacement of Burnt Clay Bricks, International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), Volume-2, Issue-2, December, 149-151.
- Soğancı, A S, 2015, The Effect of Polypropylene Fiber in the Stabilization of Expansive Soils, International Journal of Geological and Environmental Engineering, 9(8), 994-997.
- Song Q, Zou Y, Xu S, Yang Y, Bao J, Xue S, Zhang P, Sun M, 2024, Performance Study of Foam Concrete Prepared by the Synergistic Utilization of Agricultural Waste and Coal Gangue Based on Double Orthogonal Experiments, Case Studies in Construction Materials, Volume 21, 1-18.
- Song Q, Zou Y, Zhang P, Xu S, Yang Y, Bao J, Xue S, Liu J, Gao S, Lin L, 2024, Novel High-Efficiency Solid Particle Foam Stabilizer: Effects of Modified Fly Ash on Foam Properties and Foam Concrete, Cement and Concrete Composites, 105818.
- Taşdemir C, 2003, Hafif Betonların Isı Yalıtım ve Taşıyıcılık Özellikleri, TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı 5(427) , İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, 57-61.
- Taha M M, Feng C P, Ahmed S H S, 2020, Influence of Polypropylene Fibre (PF) Reinforcement on Mechanical Properties of Clay Soil, Advances in Polymer Technology, 1-15.

- Tran N P, Nguyen T N, Ngo T D, Le P K, Le T A, 2022, Strategic Progress in Foam Stabilisation Towards High-Performance Foam Concrete for Building Sustainability: A State-of-the-Art Review. *Journal of Cleaner Production*, 375, 133939.
- TSE K 314, 2014, Köpük Betondan Mamul Yerinde Döküm, Taşıyıcı Olmayan Duvar Elemanları- Binalar İçin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE K 600, 2020, EPS İlave Edilmiş Köpük betondan mamul, ön yapımı taşıyıcı olmayan, donatılı duvar elemanları- Yapılarda kullanım için- Gerekli özellikler ve deney yöntemleri, , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 680, 2006, Gaz Beton- Kuruma Büzülmesi Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12602, 2016, Ön yapımlı donatılı gazbeton yapı elemanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13501-1, 2019, Yapı mamulleri ve yapı elemanları, yangın sınıflandırması bölüm 1: Yangın karşısındaki davranış deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 13655, 2022, Kâgir birimler - Özellikler - Köpükbeton kâgir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türkel S, Kadiroğlu B, 2007, Pomza Agregalı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 353-359.
- Valore R C, 1954, Cellular Concrete Part 1 Composition and Methods of Production. *ACI J*, 50:773–96.
- Visagie M, Kearsely E P, 2002, Properties of Foamed Concrete as Influenced by Air-Void Parameters, *Concrete (101)* 8–14.
- Wee T H, Babu D S, Tamilselvan T, Lin H S, 2006, Air-Void Systems of Foamed Concrete and Its Effect on Mechanical Properties. *ACI Mater J*;103(1):45–52.
- Wei S, Yunsheng Z, Jones M R, 2014, Using the Ultrasonic Wave Transmission Method to Study the Setting Behavior of Foamed Concrete, *Construction and*

Building Materials, Volume 51, 62-74.

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.

Xu Y, Yao L, Yu X, 2024, Effect of Polypropylene Fibers on Mechanical and Wetting Properties of Overall Superhydrophobic Foamed Concrete, Construction and Building Materials, Volume 448, 1-11.

Yılmaz M, Gökhanoglu H M, Alparslan G, Özgan M Y, 2021, Köpük Beton Hakkında İnceleme, Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi 2021, 4(1): 16-21.

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.

Zhang J, Ding X, Marco M, Chen Z, 2025, Seismic Behavior and Failure Analysis of Prefabricated Foamed Concrete Composite Walls for Passive Houses, Engineering Failure Analysis, Volume 167, Part A, 1-18.

Zhang X, Guo Z, Liu S, Wu K, Yuan Z, He H, 2024, Durability Against Dry-Wet and Freeze-Thaw Cycles of Carbon Sequestration Foamed Concrete Utilizing Abandoned Soil and Waste Serpentine, Journal of Building Engineering, 95:1-16.

Zhang H, Wang J, Liu Z, Ma C, Song Z, Cui F, WU J, Song X, 2024, Strength Characteristics of Foamed Concrete Under Coupling Effect of Constant Compressive Loading and Freeze-Thaw Cycles, Construction and Building Materials, Volume 411, 13565- 1-10.

İnternet Kaynakları

- 1- <https://tur.sika.com/dms/getdocument.get/bb93379a-0655-4630-968c-adb7509e229b/sika-viscocrete-5556hi-tech.pdf>, 12.12.2023

Başpınar M S, Kahraman E, Gökhan G, Demir I, 2010, Production of Fired Construction Brick from High Sulfate-Containing Fly Ash with Boric Acid Addition, Waste Management and Research, 28(1), pp. 4–10.

Gorhan G, Demir I, Başpınar M S, Kahraman E, 2019, The Effects of Stone Powder Additive on Concrete Parquet Stone Properties, Journal of Civiltech, (1) 1, 21-27.

Demir İ, Başpınar S, Kahraman E, 2017, Köpük Betonun Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 38 (1), 109-118.

