



**KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE GENLEŞTİRME  
YÖNTEMİNİN DENEYSEL YÖNTEMLERLE  
OPTİMİZE EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan DEDE

Danışman  
Prof. Dr. İsmail DEMİR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE GENLEŞTİRME YÖNTEMİNİN  
DENEYSEL YÖNTEMLERLE OPTİMİZE EDİLMESİ**

**Hasan DEDE**

**Danışman  
Prof. Dr. İsmail DEMİR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**Haziran 2019**

## TEZ ONAY SAYFASI

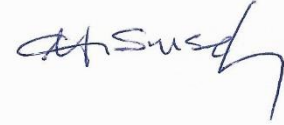

Hasan DEDE tarafından hazırlanan “Köpük Beton Üretiminde Genleştirme Yönteminin Deneysel Yöntemlerle Optimize Edilmesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. İsmail DEMİR

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

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

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



Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
/ /2019 tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

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

## BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanması 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.**

27/06/2019

Hasan DEDE



**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE GENLEŞTİRME YÖNTEMİNİN DENEYSEL  
YÖNTEMLERLE OPTİMİZE EDİLMESİ**

Hasan DEDE

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. İsmail DEMİR

Bu tez çalışmasında ısı ve ses yalıtımı sayesinde enerji ve çevre koruma özelliği öne çıkan yapı malzemesi olarak kullanılabilen ve özellikle binaların dış duvarlarında kullanılabilmeye uygun olan bir tip düşük yoğunluklu ( $370-440 \text{ kg/m}^3$ ) köpük beton üretilmiştir. Örnekler portland çimentosu, uçucu kül, ince kum, hidrojen peroksit, kimyasal katkıları kullanılarak hazırlanmış ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Çalışmada ilk aşamada ön deneme dökümleri yapılmıştır. Burada istenilen yoğunluklarda numuneler üretilmiş fakat TS 13655'te belirtilen 1,5 MPa basınç dayanımına ulaşılamamıştır. İkinci aşama olarak karışıma uçucu kül sırasıyla % 0-20-25-30-35-40 oranlarında ilave edilmiştir. Uçucu kül katkısının köpük beton örneklerinin mukavemet değerlerini artırıcı etki yaptığı ve birim ağırlık değerleri ile doğru orantılı olarak basınç mukavemeti değerlerinde artış kaydedildiği gözlenmiştir. Son aşama olarak karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı her bir seri için sırası ile katkısız (Kontrol serisi), 800 gr ve 1000 gr olarak ilave edilmiştir. Örneklerin akış değerleri incelendiğinde SA katkısı olan örneklerde “düzenli akış” (iki dakikanın altında) gerçekleşmiştir. SA katılmayan (kontrol serisi) karışımlarda akış süreleri iki dakikayı aşarak “kesikli akış” göstermiştir. Akış süreleri azaldıkça kalıba daha düzenli yerleşme ve homojen bir karışım sağlanması sonucu mukavemet gelişimi olumlu etkilenmiştir.

**2019, ix + 73 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Köpük beton, köpük ajanı, katalizörler, gözeneklilik.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **OPTIMIZATION OF EXPANSION METHOD IN FOAM CONCRETE PRODUCTION BY EXPERIMENTAL METHODS**

Hasan DEDE

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Prof. İsmail DEMİR

In this thesis, a low density (370-440 kg / m<sup>3</sup>) foam concrete, which can be used as the building material, which can be used as energy and environmental protection feature and especially for the exterior walls of the buildings, has been produced by heat and sound insulation. The samples were prepared by using portland cement, fly ash, fine sand, hydrogen peroxide and chemical additives. In the first stage of the study, pretest casting was performed. Samples were produced here at desired concentrations but the compressive strength of 1.5 MPa which is specified in TS 13655 was not reached. In the second stage, fly ash was added to the mixture in 0-20-25-30-35-40 % respectively. It was observed that the fly ash additive had an effect on increasing the strength values of the foam concrete samples and an increase in the pressure strength values was proportional to the unit weight values. In order to observe the effect on the mixing water as a final stage, the superplasticizer additive was added to each batch in order of no additive (Control series), 800 g and 1000 g respectively. At the end of the examination flow values, proper flow (less than two minutes) was occurred in the samples wich have SA additive. In the mixture which does not consist SA additive, flow time was exceeded two minutes and showed “intermittent flow “. As the flow times decreased, a more stable settling and a homogeneous mixture were provided to improve the strength.

**2019, ix + 73 pages**

**Keywords:** Foam concrete, foam agent, catalyts, porosity.

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR' e, araştırma ve deneysel alışmalar sresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mustafa Serhat BAŐPINAR' a, Sayın Arş. Grv. Erhan KAHRAMAN' a, Bülent YEŐİLAY' a, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Ayrıca bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme ve arkadaşım zge ERYEŐİL' e teşekkür ederim.

Hasan DEDE

AFYONKARAHİSAR, 2019

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
RESİMLER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	5
2.1 Beton .....	5
2.2 Hafif Beton .....	5
2.2.1 Hafif Beton Sınıflandırılması .....	6
2.2.1.1 Üretim Yöntemlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması .....	6
2.2.1.2 Basınç Dayanımlarına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	7
2.2.1.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması .....	8
2.2.1.4 Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	8
2.3 Köpük Betona Genel Bakış .....	9
2.3.1 Köpük Beton Tanımı.....	9
2.3.2 Köpük Beton Tarihçesi .....	9
2.3.3 Köpük Beton Üretimi.....	10
2.3.4 Köpük Beton ve Normal Beton Arasında Karşılaştırma .....	13
2.4 Köpük Beton Özellikleri .....	14
2.5 Konuyla İlgili Çalışmalar .....	19
3. MATERYAL VE METOT.....	26
3.1. Malzeme Bileşenleri .....	26
3.1.1 Çimento .....	26
3.1.2 Kum.....	27
3.1.3 Uçucu Kül.....	29
3.1.4 Kireç.....	31
3.1.5 Hidrojen Peroksit .....	32
3.1.6 Kimyasal Katkılar .....	34
3.1.7 Su .....	34

3.1.8 Polipropilen Lif.....	34
3.2 Metot .....	35
3.2.1 Ön Deneme Döküm Serilerin Karışım Oranları .....	38
3.2.2 Uçucu Kül Katkısız Serilerin Karışım Oranları .....	38
3.2.3 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Karışım Oranları.....	39
3.2.4 Karışım Suyuna Olan Etkisini Gözlemlemek İçin Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Karışımların Hazırlanması .....	40
3.3 Örnekler Üzerinde Yürütülen Test ve Analizler.....	41
3.3.1 Basınç Mukavemeti Deneyleri .....	41
3.3.2 Birim Ağırlık Deneyi .....	42
3.3.3 Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi .....	42
3.3.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi .....	44
3.3.5 Mikroyapı İncelemeleri.....	45
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	46
4.1 Ön Deneme Dökümlerinde Köpük Betonun H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> İle Genleşme Düzeyinin Kontrolü .....	46
4.2 Süper Akışkanlaştırıcı Etkisi ve Marsh Konisi Deneyleri Döküm Serisi Sonuçları .....	48
4.3 Uçucu Kül Katkısız Serilerin Sonuçları.....	51
4.4 Uçucu Kül Katkılı Mekanik Özellikleri.....	52
4.5 Ultrases Geçiş Test Sonuçları.....	56
4.6 İç Yapı İnceleme Sonuçları .....	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
6. KAYNAKLAR .....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	73

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$\mu\text{m}$	Mikrometre
MPa	Megapaskal
Pa	Paskal
$\text{C}_3\text{S}$	Trikalsiyum silikat
MgO	Magnezyum oksit
$\text{MnO}_2$	Manganez dioksit
B	Boraks
CS	Kalsiyum stearat
$\text{C}_2\text{S}$	Dikalsiyum silikat
$\text{C}_3\text{A}$	Trikalsiyum aluminat
$\text{C}_4\text{AF}$	Tetrakalsiyum aluminoferrit
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Demir oksit
$\text{SiO}_2$	Silisyum dioksit
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alüminyum oksit
CaO	Kalsiyum oksit
$\text{CaCO}_3$	Kalsiyum karbonat
$\text{Na}_2\text{O}$	Sodyum oksit
$\text{K}_2\text{O}$	Potasyum oksit
$\text{CaOH}_2$	Kalsiyum hidroksit
$\text{H}_2\text{O}_2$	Hidrojen peroksit

---

### Kısaltmalar

---

ASTM	The American Society for Testing and Materials
CSH	Kalsiyum silika hidrat
MPG	Mono Polipropilen Glikol
PPL	Polipropilen Lif
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu kül
XRD	X ışını difraktogramı

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Gözenekli beton ve köpük beton üretim yöntemleri .	12
Şekil 2.2 Köpük kimyasalı ilave üretim yöntemi ile köpük beton hazırlama şeması.....	12
Şekil 3.1 İnce kuma ait tane boyutu analiz grafiği.....	27
Şekil 3.2 Soma uçucu külüne ait tane boyutu analiz grafiği. ....	30
Şekil 3.3 Köpük beton üretim şeması. ....	35
Şekil 3.4 Kullanılan akış (Marsh) konisi ebatları. ....	43
Şekil 4.1 Ön deneme karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.....	46
Şekil 4.2 Basınç mukavemeti – kuru birim ağırlık ilişkisi grafiği. ....	49
Şekil 4.3 Süper akışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız örnekler marsh konisi akış süresi ilişkisi grafiği. ....	50
Şekil 4.4 Uçucu kül katkısız karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği. ....	51
Şekil 4.5 Uçucu kül ilaveli örneklerin yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği. ....	53
Şekil 4.6 Uçucu kül katkısız ve uçucu kül ilaveli numuneleri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi. ....	53
Şekil 4.7 Uçucu kül katkısız seri kuru birim ağırlık – basınç mukavemeti -ultrases geçiş hızı deney sonuçları. ....	56
Şekil 4.8 Uçucu kül katkılı seri kuru birim ağırlık – basınç mukavemeti -ultrases geçiş hızı deney sonuçları. ....	57
Şekil 4.9 Uçucu kül katkılı ve uçucu kül katkısız numunelerin yoğunluk - ultrases geçiş hızı deney sonuçları. ....	57
Şekil 4.10 Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için SA katkılı serileri numunelerinin kuru birim ağırlık – basınç mukavemeti – akış süresi - ultrases geçiş hızı değerleri. ....	58

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması. ....	7
Çizelge 2.2 Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması. ....	8
Çizelge 2.3 Köpük beton üretim metotlarının yoğunluk ve basınç dayanımına etkisi. ..	18
Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri. ....	26
Çizelge 3.2 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri. ....	27
Çizelge 3.3 Agregada organik madde referans renkleri. ....	28
Çizelge 3.4 Soma uçucu külünün kimyasal yapısı. ....	29
Çizelge 3.5 Sönmemiş kireç kimyasal yapısı. ....	32
Çizelge 3.6 Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı özellikleri. ....	34
Çizelge 3.7 Köpük beton ön deneme karışım oranları. ....	38
Çizelge 3.8 Köpük beton uçucu kül katkısız serisi karışım oranları. ....	38
Çizelge 3.9 Köpük beton uçucu kül ilaveli üretimi karışım oranları. ....	39
Çizelge 3.10 Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için SA katkılı karışım reçetesi. .....	40
Çizelge 3.11 Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırılma. ....	43
Çizelge 4.1 Ön deneme karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi. ....	46
Çizelge 4.2 SA katkısız-katkılı karışım numunelerinin kuru birim ağırlık - basınç dayanımı ilişkisi değerleri. ....	48
Çizelge 4.3 Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve marsh konisi akış süresi sonuçları. 50	
Çizelge 4.4 Uçucu kül katkısız serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi. ....	51
Çizelge 4.5 Uçucu kül ilaveli numunelerin kuru birim ağırlık-basınç mukavemeti ilişkisi değerleri. ....	52
Çizelge 4.6 Çalışmalarda üretilen köpük beton numuneleri üzerinde uygulanan deney sonuçları. ....	55
Çizelge 4.7 Numunelerin birim ağırlığı ve hücre boyut aralıkları. ....	59

## RESİMLER DİZİNİ

### Sayfa

<b>Resim 2.1</b> Hafif beton türlerinin içyapı şekilleri.....	7
<b>Resim 2.2</b> Köpük beton gözenek sistemleri (a) yapay hava boşluğu; (b):ara gözenek; (c)molekül arası gözenek.....	14
<b>Resim 3.1</b> Çalışmada kullanılan ince kum.....	27
<b>Resim 3.2</b> Çalışmada kullanılan uçucu kül.....	30
<b>Resim 3.3</b> Deneylerde kullanılan kireç.....	32
<b>Resim 3.4</b> Çalışmada kullanılan hidrojen peroksit,süper akışkanlaştırıcı ve plopropilen lif görüntüsü. ....	33
<b>Resim 3.5</b> 10x10x10 cm ebatlandırılmış köpük beton numuneleri.....	35
<b>Resim 3.6</b> Karıştırma el mikseri (solda), karıştırma kabı (sağda).....	36
<b>Resim 3.7</b> Genleştirme sonrası çökme gerçekleşmiş numune. ....	36
<b>Resim 3.8</b> Genleşme gerçekleşmiş köpük beton numuneleri. ....	36
<b>Resim 3.9</b> Numunelere uygulanan basınç mukavemeti deneyi. ....	41
<b>Resim 3.10</b> Etüv kurusu numunelerin tartımı. ....	42
<b>Resim 3.11</b> Akış (Marsh) konisi. ....	44
<b>Resim 3.12</b> Numunelere uygulanan ultrases deneyi.....	45
<b>Resim 3.13</b> SEM cihazı. ....	45
<b>Resim 4.1</b> Köpük beton numunelerinin hücre yapıları.....	60
<b>Resim 4.2</b> Numune içyapılarında genel olarak izlenen kısmi kristal CSH Jel yapısı. ...	61
<b>Resim 4.3</b> Numune içerisinde gözlemlenen kristal CSH plaka oluşumları.....	61
<b>Resim 4.4</b> CSH jel yapısı ile bir arada gözlenen portlandit yapıları. ....	62
<b>Resim 4.5</b> Köpük beton için kullanılan PP fiberlerin yapı içindeki görüntüsü.....	63

## 1.GİRİŞ

Son zamanlarda, sınırlı enerji kaynaklarının öncülünde olan dünyadaki enerji arzı talebinin artmasıyla birlikte, enerji tasarrufu veya sosyal ve endüstriyel faaliyetlerde yüksek verimli enerji kullanımı çoğu ülkede temel bir politika haline gelmektedir. Araştırma, binaların enerji verimliliğini giderek daha fazla ilgilendirdiği için, yüksek ısı yalıtımı sunan malzemeler için modern inşaat ve yapı endüstrisinin hedefi haline gelmiştir (Liu and Zhang 2017). Her ne kadar köpük beton başlangıçta bir yalıtım malzemesi olarak öngörülmüş olsa da, daha hafif ağırlığı, malzemedeki tasarruf ve toz haline getirilmiş uçucu külü gibi atıkların büyük ölçekli kullanım potansiyeli nedeniyle yapısal özelliklerine yeniden ilgi duyulmuştur (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Köpük beton fiziksel, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle günümüzde tercih edilen bir malzeme olma durumundadır. Kendiliğinden yayılan, sıkıştırma gerektirmeyen hafif beton sınıfının bir tipidir (Ramamurthy *et al.* 2009). Normal ağırlıktaki betondan farklı olarak, köpük beton, tasarım yoğunluğunu etkileyecek herhangi bir sıkıştırma veya titreşime maruz bırakılamaz. Bu nedenle köpük betonun önemli taze hal karakteristikleri akışkanlık ve kendiliğinden yayılmadır (Kim *et al.* 2008). Isı ve ses yalıtımı, dolgu betonu, çatı yalıtımı, köprü yapımı, köprü yaklaşımlarında dalgalanmanın önlenmesi amaçlı, yolların inşasında, yumuşak zemin tabanında, birçok altyapı uygulamalarında, prekast ve yerinde döküm uygulamaları, duvar blokları vb. geniş bir uygulama alanı vardır (İnt.Kyn.1).

Çimento, ince kum, uçucu kül vb. malzemelere su ilave edilerek mikserde karıştırılıp akıcı kıvamda elde edilen harca kararlı halde köpük ilave edilmesi veya baz karışıma bir köpürtme ajanı ilave edilip harcın genişletmesiyle üretilebilir. Taze beton harcına köpük veya köpürtme ajanı ilave edilerek sertleşmiş bünyede gözenek oluşturulur, bu nedenle köpük beton adını alır (Tan *et al.* 2014).

Köpük beton, yüksek akış kabiliyeti, düşük öz ağırlık, düşük agrega tüketimi, kontrollü düşük dayanımı ve mükemmel ısı yalıtımı sayesinde büyük ilgi görmektedir. Buna ek olarak, köpük betonun minimum agrega kullanımı ve atık malzemelerin dahil edilmesindeki yüksek potansiyeli nedeniyle çevre dostu bir malzeme olduğu düşünülmektedir (Awang and Ahmad 2014). Önceden üretilmiş köpük ve köpürtme ajanı miktarında ve üretim yöntemlerinde uygun kontrol sayesinde, köpük betonun yoğunluğu geniş bir aralıkta oluşturulabilir (Awang *et al.*

2012). Köpük beton kuru birim ağırlığı 400-1600 kg/m<sup>3</sup> aralığında ve basınç dayanımı 1-15 MPa arasında üretilebilmektedir. Priz süresini uygun kür ortamında tamamlayan köpük beton yeterli dayanım ve dayanıklılık kazanır (Jones and McCarthy 2005).

Köpük betonun özelliklerini etkileyen başlıca faktörler çimento-kum oranı, su-çimento oranı, çimento ve içerik tipi, gözenek büyüklüğü ve dağılımı, köpürme maddesi tipleri ve kürleme yöntemleridir (Awang *et al.* 2012). Köpük betonda hava boşlukları uygun köpükleştirici madde veya uygun köpürtücü ajan eklenmesi ile harç içinde tutulur (Ramamurthy *et al.* 2009, Awang *et al.* 2012). Köpük betonda gözenekliliğin ve uçucu kül içeriğinin artması köpük betonun hava ve su buharı geçirgenliğini artırmaktadır. Yoğunluğun azalması ile basınç dayanımını düşürmektedir (Mydin and Wang 2010). Hava boşluğu boyutunun daha dar dağılımının, daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edilebileceği, daha büyük boşlukların daha düşük mukavemet ile sonuçlanmaktadır (Kuzielová *et al.* 2016).

Köpük betonun üretiminde çoğunlukla kaba agregası yoktur. Doğru terim, beton yerine harç olarak adlandırılacaktır. Bazen herhangi bir ince agregası olmaksızın sadece çimento ve köpüğün karışımı nedeniyle Köpüren Çimento veya Köpük Çimento olarak da adlandırılabilir (Kallunkal and John 2016). Köpük betonda iri agregası kullanılmadığı için ince agregası kısmen veya tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemelerle değiştirilebilir (Kuzielová *et al.* 2016).

Köpük betonun minimum agregası kullanımı ve atık malzemelerin dahil edilmesindeki yüksek potansiyeli nedeniyle çevre dostu bir malzeme olmaktadır. Dünya genelinde inşaatçılar, çoğunlukla gaz beton olarak adlandırılan köpüklü betonun kullanımında artan miktara dikkat ediyorlar. Büyüyen enerji tasarrufu gerekliliği ve çevre dostu düşünceler köpük betonun kullanımının artmasını ön plana çıkarmaktadır (Bing *et al.* 2011). Köpük beton, inşaat mühendisliği işlerinde kullanılacak benzersiz özellikler içerir. Köpük beton kullanılması, yapı ve temel üzerindeki ölü yükleri azaltır, enerji korunmasına katkıda bulunur ve inşaat sırasında işgücü maliyetini düşürür. Aynı zamanda normal betona kıyasla yapı parçalarının üretim maliyetini ve taşınmasını da azaltır ve yapısal bir malzeme olarak kullanılma potansiyeline sahiptir (Shankar and Joy 2015, Kallunkal and John 2016).

Köpüklü beton hem kimyasal hem de mekanik köpüklendirme yöntemleriyle işlenebilir:

Mekanik köpüklenme yöntemi (önceden üretilmiş köpük kullanılan yöntem): Portland çimentosunun, ticari bir köpüklendirme maddesi kullanılarak önceden oluşturulmuş bir sulu köpükle karıştırılması ile üretilmesiyle elde edilir. Bu tekniğin sınırlaması şunlardır:

- Üretilen köpük yoğunluğunun her zaman aynı olmaması nedeniyle üretilen köpük betonların yoğunlukları genellikle tekdüze değildir;
- Önceden portland çimento harcına katılmak için önceden üretilmiş olan köpük, üretildiği andan itibaren çökmeye başlar (Cited *et al.* 1994).

Kimyasal köpürme yöntemi: kimyasal maddelerin çimento, uçucu kül ve diğer maddelerle doğal kimyasal tepkimesi sırasında yapılır; karışımda gaz üretmek için portland çimentosu ile karıştırılan kimyasallar kullanılır (Yuli *et al.* 2014). Şu anda, alüminyum tozu ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, gözenekli çimento esaslı malzemelerde kullanılan iki yaygın kimyasal köpürme ajanıdır. Bununla birlikte, alüminyum tozundan salınan hava miktarı esas olarak bulamaçtaki alkali malzemeler ile reaksiyonuna dayanır. Bu da hava serbest bırakma hızını kontrol etmeyi zorlaştırır. Öte yandan, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin ayrışma hızı, çimento bulamacına eklenen katalizör miktarı ile kolaylıkla kontrol edilebilir (Cited *et al.* 1994).

Köpük beton normal betona göre belirgin üstün özelliklere sahiptir (Ramamurthy and Nambiar 2009, Wee *et al.* 2006). Bu özelliklere göre;

- Kendiliğinden yerleştiği için sıkıştırma gerektirmez.
- Hafiftir, aşırı yük getirmez.
- Serbestçe akarak tüm boşlukları doldurmak için yayılır.
- Döküldükten sonra bakım gerektirmez.
- Önemli yanal yükler yüklenmez.
- Güvenilir kalite kontrolü, örneklerin yeniden üretilmesi kolaydır.
- Donma- çözünme dayanımı çevrimi (1000 çevrim -18 °C +20 °C'de)
- Zamana bağlı düşük su emme
- Uygulama ve servis ömrü boyunca tehlikeli madde içermez.
- Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha uygun maliyete sahiptir.
- Hızlı çalışma imkânı sağlar.

Köpük beton; duvar blokları ve bölme veya taşıyıcı paneller, zeminlerde şap ve tesviye amaçlı olarak üretilebilir. Bu uygulamalar uygulandıkları yapılarda ısı, ses yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında üç aşama deney gruplu dökümler gerçekleştirilmiş, köpük betonun  $H_2O_2$  ile geniştirilip özellikle binaların dış duvarlarında kullanılabilmeye uygun  $400 \text{ g/cm}^3$ 'lük düşük yoğunluğa sahip köpük betonun bu yöntemle üretilebilirliği ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır.



## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Beton

Beton, belirli yöntemlere göre karışım hesapları yapılan, çimento, agrega, su ve gerekli durumlarda kimyasal katkıları kullanılarak, kullanılmak istenen yerin şekil ve boyutuna göre yerleştirilen ve uygun kür altında prizini tamamlamasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir. Beton başlangıçta plastik kıvamda olup daha sonra çimentonun hidrasyonu sebebiyle sertleşen bir yapı malzemesidir (Gülşahin 2006). Burada agrega dolgu malzemesi, su ve çimento harcı ise agregalar arasını dolduran ve bu agregaları birbirine bağlayarak belli bir kütlenin bir araya gelmesini sağlayan bağlayıcı malzemeyi oluşturmaktadır. Betonun diğer yapı malzemelerinden ayıran en önemli özelliklerinden biri ise plastik kıvamda iken istenilen şekil verilebilmesidir (Binici vd. 2000).

### 2.2 Hafif Beton

Hafif beton, son yıllarda çok çeşitli inşaat projelerinde büyük ilgi ve büyük endüstriyel talep yaratan çok yönlü bir malzeme olarak kabul edilir. Geleneksel (normal ağırlıkta) agrega betonundan daha hafiftir. Yaklaşık 300 ile 2000 kg/m<sup>3</sup>'ü aşmayan bir fırın kuru yoğunluğu aralığına sahiptir. Bu değerler normal ağırlıktaki betona göre (yaklaşık 2100–2500 kg/m<sup>3</sup>) karşılaştırabilmektedir (Hamad Mohammed and Hamad 2014). TS EN 206-1' de hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı, 800 kg/m<sup>3</sup>' ten büyük, 2000 kg/m<sup>3</sup>' ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilebilir (TS EN 206-1 2002). Hafif betonun geleneksel portland çimentosu betonuna kıyasla temel avantajları ağırlık azaltmasıdır (Chica and Alzate 2019).

Hafif betonlar kullanılarak inşa edilen yapılarda ölü yük azaldığından dolayı taşıyıcı olan elemanlarda küçülme ve bu elemanlarda kullanılan donatılarda azalma olacaktır (Demirel ve Yazıcıoğlu 2010). Betonun kendi ağırlığındaki önemli bir azalma nedeniyle inşaat ve nakliye maliyetleri açısından tasarruf sağlayacaktır. Ayrıca daha uzun açıklıklı alanlar oluşturulması ve daha küçük elemanlar vb. gibi yapısal tasarımlarda daha fazla esneklik sağlanmasına izin veren uygulamalara olanak sağlayacaktır. Hafif betonda standart betonuna göre ağırlığının azaltılması, özellikle deprem bölgelerinde inşa edilmiş yapılar için tercih edilir (Mo *et al.* 2016).

Ayrıca düşük ısı iletkenlik katsayısı, ses yalıtımı sağlaması ve standart betona göre daha hafif olması ve kullanıldığı kalıba daha az basınç uygulaması en önemli avantajlarıdır (Türkel ve Kadiroğlu 2007).

### **2.2.1 Hafif Beton Sınıflandırılması**

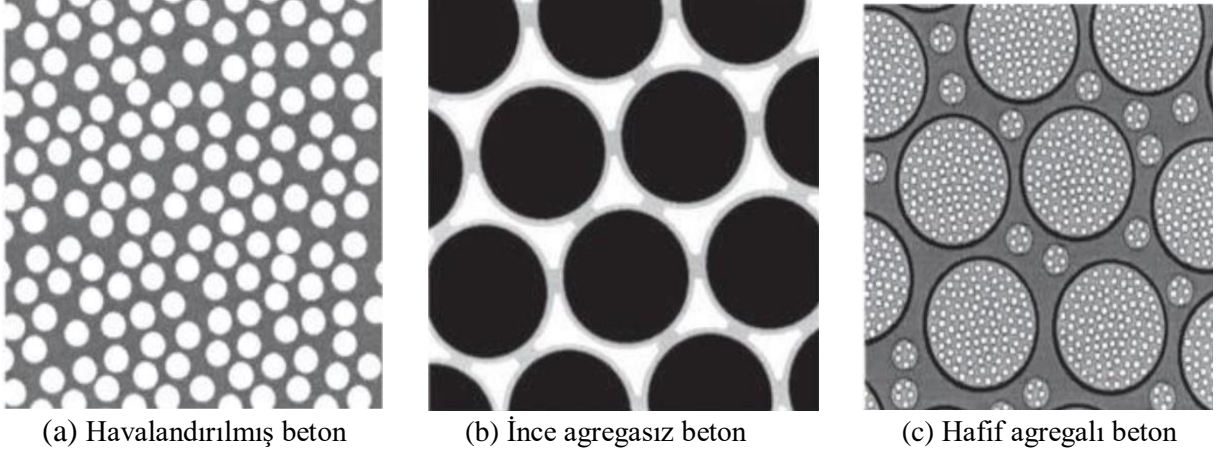
Hafif betonların birçok türü olduğundan birbirinden farklı sınıflandırmalar yapılmıştır. Üretim yöntemlerine ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmışlardır (Uygunoğlu 2008). Bunlar;

- Üretim Yöntemlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması
- Basınç Dayanımlarına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması
- Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması

#### **2.2.1.1 Üretim Yöntemlerine Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması**

Hafif beton üretilebilmesi için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar;

- a) Normal ağırlıktaki agrega yerine düşük özgül ağırlıktaki hafif agrega kullanılarak (hafif ağırlıktaki agrega özgül ağırlığı 2.6'dan düşüktür) üretilmesi. Bu tip beton, hafif agrega betonu olarak bilinir.
- b) Beton veya harç kütlesi içerisinde hava gözenekleri oluşturmak. Bu tip beton havalandırılmış, hücreli, köpürtülmüş veya gaz betonu olarak bilinir.
- c) İnce agrega karışımından çıkarılarak normal ağırlığa sahip kaba agrega kullanılır. Bu beton ince agregasız beton olarak bilinir.



**Resim 2.1** Hafif beton türlerinin içyapı şekilleri (Hamad Mohammed and Hamad 2014).

### 2.2.1.2 Basınç Dayanımlarına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması

TS EN 206-1 (2002)'de de hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Çizelge 2.1'de de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar sınıflandırılmışlardır.

**Çizelge 2.1** Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.

Basınç Dayanım Sınıfı	En Düşük Karakteristik Dayanımı	
	Silindir (f <sub>ck,sil</sub> ), MPa	Küp (f <sub>ck,küp</sub> ), MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

### 2.2.1.3 Birim Hacim Ağırlığına Göre Hafif Betonların Sınıflandırılması

TS EN 206 (2002)' de hafif betonlar birim hacim ağırlığına göre Çizelge 2.2'de verildiği gibi D 1,0 ile D 2,0 arasında sınıflandırılmışlardır. Buna göre bir betonun birim hacim ağırlığı açısından hafif beton sınıfında olabilmesi için birim hacim ağırlık değerinin  $800 \text{ kg/m}^3$  'ten az ve  $2000 \text{ kg/m}^3$  'ten fazla olmaması gerekmektedir.

**Çizelge 2.2** Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.

Hafif Beton	Birim Ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ )
Yalıtım Betonları	$300 \text{ kg/m}^3 - 800 \text{ kg/m}^3$
Orta Mukavemetli Hafif Betonlar	$800 \text{ kg/m}^3 - 1400 \text{ kg/m}^3$
Taşıyıcı Hafif Betonlar	$> 1400 \text{ kg/m}^3$

Alman standartı DIN 1045 'e göre betonlar birim ağırlıklarına göre şöyle sınıflandırılırlar:

Hafif betonlar: Birim ağırlık  $< 2000 \text{ kg/m}^3$

Normal Betonlar:  $2000 \text{ kg/m}^3 < \text{birim ağırlık} < 2800 \text{ kg/m}^3$

Ağır betonlar: Birim ağırlık  $> 2800 \text{ kg/m}^3$

### 2.2.1.4 Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif betonun fiziksel ve mekanik özellikleri, hafif betonu oluşturan her bir bileşenin kimyasal yapısı ve birbiriyle etkileşimleri ile ilişkilidir. Dayanım, betonun en önemli özelliklerinden biridir ve genel olarak betonun birim ağırlığıyla yakından ilişkilidir. Hafif agregalı betonlar farklı özelliklerde olup, kullanılan agregalar ve karışımındaki bileşenler hafif beton özelliklerini etkilemektedir. Beton prizini tamamladıktan sonra hacminde değişime uğrar. Bu değişimler hafif betonun özellikleriyle ilişkili olup, hafif betonların fiziksel ve mekanik özellikleri şunlardır;

- Dayanım,
- Yoğunluk,
- Isıl özellikler,
- Su emme,
- Yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlar,
- Aşınma direnci (Uygunoğlu 2008).

## 2.3 Köpük Betona Genel Bakış

### 2.3.1 Köpük Beton Tanımı

TS 13655 (2015)'e göre köpük beton, çimento ve/veya kireç gibi hidrolik bağlayıcının, silis esaslı ince malzeme, gözenek (kapalı boşluk) oluşturan malzeme ve su ile karıştırılmasıyla elde edilen malzemedir. Köpük beton kuru birim ağırlığı 300-1000 kg/m<sup>3</sup> arasında değişebilmekte ve minimum basınç dayanımı 1,5 MPa olmalıdır.

Köpük beton, milyonlarca eşit dağılmış ve tutarlı bir şekilde hava kabarcıkları veya hücreleri içeren, çimento bazlı bir harç türüdür. Köpük beton, düşük asgari ağırlıkta, kontrollü düşük mukavemetli ve mükemmel ısı yalıtımına sahiptir (Chandni and Anand 2018).

Jones and McCarthy (2005) köpük betonu; hafif, dayanıklı, kullanımını basit, çevresel açıdan sürdürülebilir ve fabrika gereklilikleri ile sınırlandırılmadan çok yönlü olan mükemmel özelliklere sahip çok yönlü bir yapı malzemesi olarak tanımlanmıştır.

Köpük betonun üretiminde çoğunlukla kaba agregaya yoktur. Doğru terim, beton yerine harç olarak adlandırmak olacaktır. Bazen herhangi bir ince agregaya olmaksızın sadece çimento ve köpüğün karışımından oluşması nedeniyle Köpüren Çimento veya Köpük Çimento olarak da adlandırılabilir (Chica and Alzate 2019).

### 2.3.2 Köpük Beton Tarihçesi

Tarihsel olarak, Romalılar ilk olarak, küçük kireç ve sıcak kireç ve su ile kaba kum karışımına hayvan kanı ekleyerek ve çalkalayarak, karışımı daha kullanışlı ve dayanıklı hale getiren küçük hava kabarcıkları oluşturulduğunu fark ettiler. Bununla birlikte, ilk Portland çimentosu esaslı köpüklü beton 1923 yılında Axel Eriksson tarafından patentlenmiştir. İlk kapsamlı çalışma Valore tarafından hücreli beton üzerinde gerçekleştirilmiştir (Kallunkal and John 2016).

Son yıllarda, üretim ekipmanları ve daha nitelikli katkıları içinde önemli gelişmeler olup, köpük ajanları daha büyük ölçekte köpük betonun kullanımına olanak sağlamıştır. Köpük betonun özelliklerini ve davranışlarını incelemek için kapsamlı şekilde birçok araştırma üretim metodlarını basitleştirmek amacıyla yapılmıştır. Köpük betonun düşük yoğunluk gibi üstün

özelliklere sahip olduğunu ve yapısal ölü yükleri, temel boyutunu, işçiliği, ulaşım ve işletme maliyetlerini azaltmaya yardımcı olmaktadır (Chica and Alzate 2019).

Normal beton üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı köpük beton için de yapılmıştır (Kuzuelova *et al.* 2016, Şahin vd. 2018, Li *et al.* 2019, Ducman and Korat 2016). Ülkemizde ise köpük beton üzerine yürütülen bilimsel çalışmaların sayısı kısıtlıdır. Fakat köpük betonun özelliklerini etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Ülkemizde de köpük beton üzerine detaylı bilimsel araştırmaların yürütülmesi ve yayınlanması, bu alanda üretim yapan (ya da yapmayı hedefleyen) girişimci ve sanayicilere ışık tutacaktır.

### 2.3.3 Köpük Beton Üretimi

Köpük beton üretmek için kullanılan ana malzemeler, çimento harcı, önceden üretilmiş köpük veya baz karışımın içerisine ilave edilen köpürtme ajanı ve kimyasal katkıdır. Çimento harcı normalde çimento, ince kum ve su karışımı içeren taze betondur. İlave olarak karışım betonunun ağırlığını azaltmak için köpük protein, sentetik bazlı köpük veya köpürtme ajanı ilave edilir (Aini *et al.* 2017).

Köpük beton üretim işleminde kullanılabilecek iki teknik vardır; ön köpükleme yöntemi ve karışıma köpük kimyasalı ilave yöntemi.

Her iki yöntem de karıştırma işlemi ile köpüklü betonun kalitesini kontrol eder.

Ön köpükleme yöntemi; çimento, su, agrega karışımının üretilmesini ve hücrel bir yapı oluşturmak için taze karıştırılmış betona eklenen önceden oluşturulmuş hava kabarcıklarını oluşturmak için sıkıştırılmış bir hava makinesinin kullanılmasını gerektirir. Ön köpükleme, ıslak köpük veya kuru köpük kullanılabilir. Islak köpük, 2-5 mm'lik bir ağ üzerinde bir köpürme ajanı çözeltisinin püskürtülmesini gerektirir ve kuru köpükten sonra nispeten daha az kararlıdır. Kuru köpük, köpürme ajanı çözeltisini bir dizi yüksek yoğunluk sınırlaması ile zorlayarak ve basınçlı havayı bir karıştırma alanında zorlayarak üretilir. Burada, proteinlerin parçalanması sonucu hava kabarcıkları üretilir (Kuzielová *et al.* 2016). Üretilen köpük yeterince katı, sıkı ve kararlı, olmalı ki; çimentonun priz başlangıcına kadar harcın oluşturduğu basınca karşı koyabilsin ve gözenekli bir iskelet yapısı kazanabilsin (Ramamurthy *et al.* 2009, Hamad Mohammed and Hamad 2014).

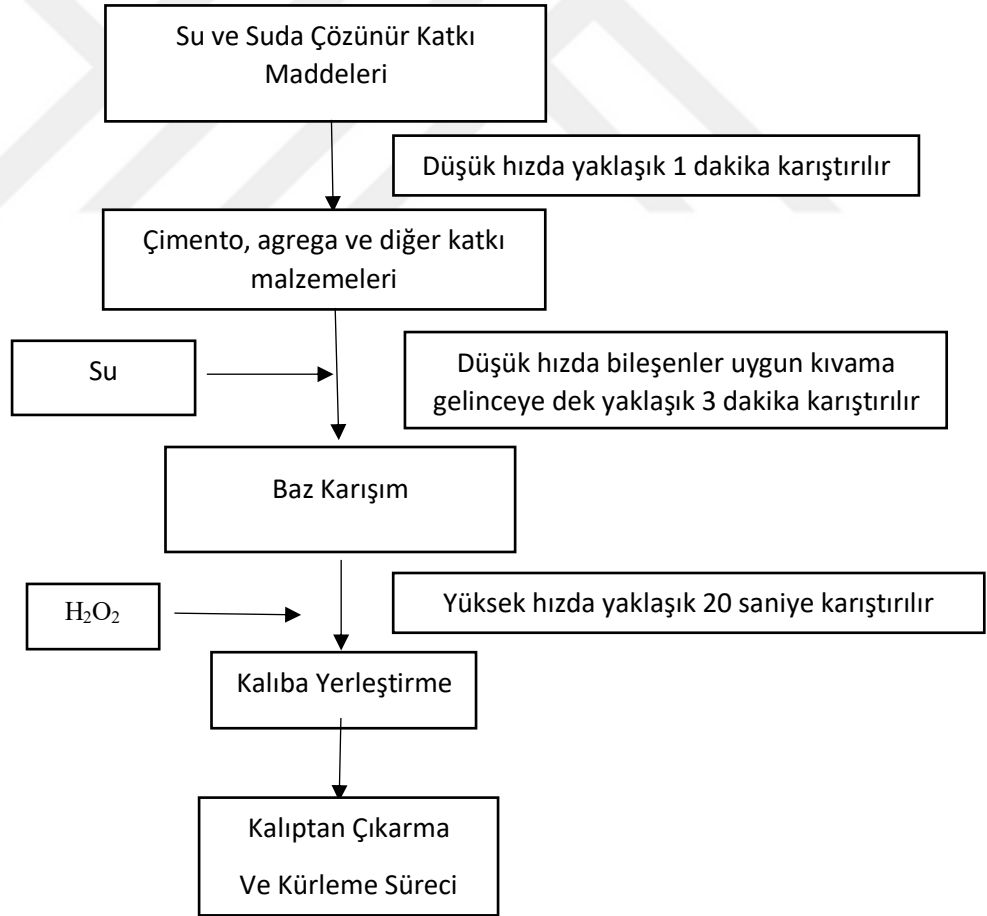
Karışıma köpük kimyasalı ilave etme yönteminde, yüzey aktif madde, karıştırma işlemi sırasında özel olarak çimento, su, agrega karışımına eklenir ve yüksek hızda karıştırılır. Genel olarak, bu yöntemin yürütülmesi basittir, standartlaştırılmıştır ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Panesar 2013). Karışıma ilave edilen köpürtme ajanları, köpürtülmüş betonda birbirinden bağımsız mikro gözenekli hava boşluklarının oluşmasını sağlar. Oluşan bu hava boşluklarının çimento ilk olarak kuruyuncaya kadar harç basıncına dayanabilmesi için köpüğün sabit ve kararlı olması şiddetle önerilir (Amran *et al.* 2015). Alüminyum tozu ve Hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ), gözenekli çimento esaslı malzemelerde kullanılan iki yaygın kimyasal köpük ajanıdır. Bununla birlikte, alüminyum tozundan salınan hava miktarı esas olarak karışımdaki alkali malzemelerle reaksiyonuna dayanmakta, bu da havanın serbest bırakılma hızının kontrolünü zorlaştırmaktadır. Diğer yandan,  $H_2O_2$ 'nin ayrışma hızı, çimento bulamacına eklenen katalizör miktarı ile kolayca kontrol edilebilir (Wang *et al.* 2016).

Stabil bir hücreli beton karışımının üretimi, köpük ajanı, köpük üretim metodu ve karışım dizaynı gibi birçok faktöre bağlıdır. Hangi üretim yöntemi olursa olsun, köpük betonlarda, mesele havanın nasıl tutulacağı ve kütleyle eşit olarak dağıtılmasıdır. Önceden oluşturulmuş köpükte, köpük çözünmemesi için çok kararlı olmalıdır. Karıştırma yönteminde katkı maddesi havayı hapsedmeli ve homojen bir şekilde dağılmasını sağlamalıdır. Hücreli betonun sertleşmesi normal koşullarda, buhar veya otoklavlanmış buhar kürü olarak yapılabilir. Hücreli beton yapımında en etkili yöntem, köpüklenme ajanlarını kullanan yöntemdir, çünkü elde edilen basınç dayanımları daha yüksektir. Hazır imalat ile yüksek kaliteli elemanlar üretmek için, sabit bir ortam sıcaklığının muhafaza edilmesi gerekir ve herhangi bir kürleme sistemi kullanılabilir (Chica and Alzate 2019). Karıştırma yönteminde, köpürme ajanı, yüksek dönme hızı nedeniyle kabarcıklar yaratan bir mikserde eklenir. Köpüklerin hazırlama işlemi sırasında çökme eğilimi, hücreli yapıların özelliklerini kontrol etmede bazı zorluklar doğurmaktadır (Hills *et al.* 1998, Chica and Alzate 2019).

Şekil 2.1'de şematik olarak köpük beton üretim yöntemleri verilmiştir. Genel olarak bu yöntemlerle köpük beton üretilmekte olduğu Mohammed and Hamad (2014) tarafından vurgulanmaktadır. Kimyasal madde ile köpük beton üretimi Şekil 2.2' de verilmiştir (Li *et al.* 2015).



Şekil 2.1 Gözenekli beton ve köpük beton üretim yöntemleri.



Şekil 2.2 Köpük kimyasal ilave üretim yöntemi ile köpük beton hazırlama şeması.

### 2.3.4 Köpük Beton ve Normal Beton Arasında Karşılaştırma

Sert kayadan kaynaklanan doğal agrega ile yapılan normal beton, 2200-2260 kg/m<sup>3</sup> arasında yüksek bir yoğunluğa sahiptir ve yapı üzerindeki ölü yükün büyük bir kısmını temsil eder. Köpük beton 400 ile 1800 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen yoğunluğundan dolayı hafif bir malzeme olarak sınıflandırılır ve hafif olması sebebiyle yapıda oluşan ölü yükü azaltmada önemli bir etken olmuştur. Yapı parçalarının üretim ve taşınma maliyetini azaltır, yapısal bir malzeme olarak kullanılma potansiyeline sahiptir. Sıkıştırma gerektirmez, kısıtlı ve düzensiz boşlukları doldurmak için bir çıkıştan kolaylıkla akacaktır ve önemli mesafeler ve yükseklikler üzerinde pompalanabilir, böylece serbest akışlı bir kendinden ayarlı malzeme olduğu söylenebilir. Köpük beton yoğunluğunun normal betona kıyasla az olmasının en önemli sebeplerinden biri olan içerisinde bulunan mikro gözenekli hava boşlukları ile köpük betonun çok iyi ısı ve ses yalıtımına sahip olması ve düşük yoğunluğa sahip olma özelliği ile kendinden yerleşebilme özellikleri en önemli avantajlarıdır (Kallunkal and John 2016). Örneğin; yapının taban alanı tesviye işleminde ve duvar yapı elemanlarında uygun yoğunluklu köpük beton kullanılması halinde normal betona kıyasla yapıya:

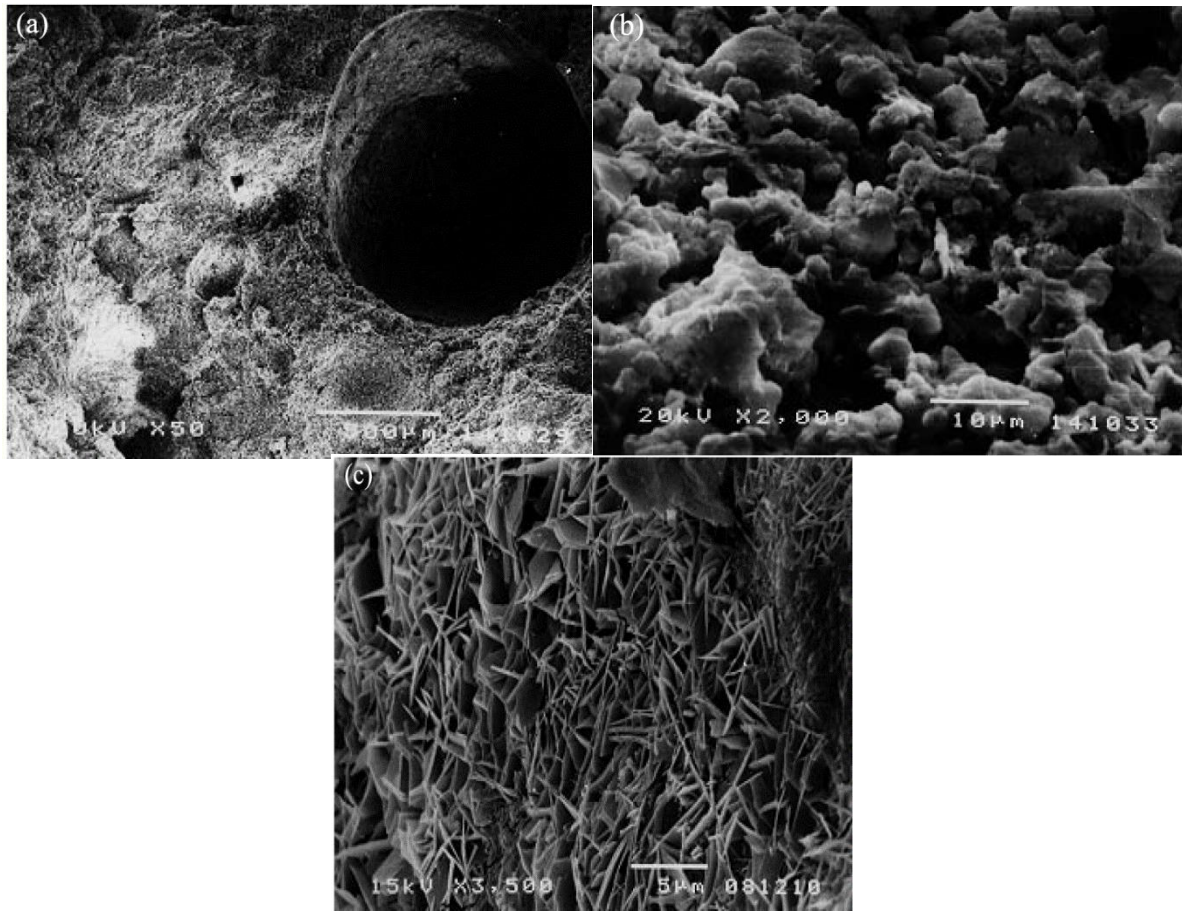
- Katlar arası ve dış çevre ile ısı geçişini azaltarak ısı daha etkili bir ısı yalıtımı sağlanması.
- Katlar arası ve dış çevre ile ses geçişinin azalması.
- Uygulama kolaylığı sayesinde daha az iş gücü harcanması ve beraberinde işçilik maliyet azalımı.
- İş gücü maliyetinin azaltılması.
- Hava geçirgenliği sayesinde yapı içerisinde en uygun nem içerisinde hayat sürdürebilme avantajları olacaktır (İnt.Kyn.2).

Köpük betonun ısı iletkenliği tipik olarak normal ağırlıktaki betonun %5 ile 30' udur ve kuru yoğunluk değerleri için sırasıyla 600 ile 1600 kg/m<sup>3</sup> arasında 0.1 ile 0.7 W/m.K arasındadır. Pratikte normal ağırlıktaki beton benzer ısı yalıtımını elde etmek için köpük betondan 5 kat daha kalın olmalıdır. Köpük betonun 1000 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğu ile termal iletkenliğinin, tipik çimento-kum harcı değerinin 1/6' sı olduğu bildirilmektedir. Köpük beton, çimento bazlı bir karışıma hava enjekte edilerek üretildiğinden, yoğunluğu doğrudan içerisindeki havanın

boşluklarına bağlıdır. Köpük betonun yoğunluğu termal özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır (Awang *et al.* 2012).

## 2.4 Köpük Beton Özellikleri

Köpük beton, karışım aralarında iletilmeyen küçük hava kabarcıkları içeren homojen bir yapı sunar. Bu hava kabarcıkları, prizini tamamlamış elemanlarda, yaklaşık olarak küresel olan 0,1 ile 1,0 mm arasında bir çapa sahiptir. Bu hücre yapısı, malzemenin fiziksel özelliklerini, hafifliği, düşük ısı iletkenliğini, basınç dayanımı ve gözeneklerin büyüklüğü ve dağılımı nedeniyle donmaya karşı düşük direnci belirler (Chica and Alzate 2019).



**Resim 2.2** Köpük beton gözenek sistemleri (a) yapay hava boşluğu; (b) ara gözenek; (c) molekül arası gözenek (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Köpük betonun malzeme yapısı, katı mikro gözenekli matrisi ve makro gözeneklerinin varlığı ile irdelenir ve sonuca varılır. Makroporlar, malzeme içerisine hava girişinin neden olduğu kütlelenin genişlemesi nedeniyle oluşur ve mikroporlar, makroporlar arasındaki duvarlarda görünür. Makroporlar, 60 µm'den daha büyük bir çapa sahip gözenekler olarak öngörülmüştür. Köpük betonun gözenekliliği ve gözenek büyüklüğü dağılımı, sertleştirme yöntemine göre

önemli ölçüde değişir. Köpük betonun daha yüksek gözenekliliği, makro gözenek hacmindeki artışın bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır ve bu da daha ince gözenekli duvarlarla sonuçlanmakta ve böylece mikro gözenek hacminin payını azaltmaktadır. Ayrıca, gözenekliliğin hücre yapısının çökmesine neden olabileceği için, gözenekliliğin oluşması esnasındaki tüm faktörlerin hassasiyet ile incelenmesi gerekmektedir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Taze halde, köpüklü beton karışımı sıvıdır ve kendiliğinden yerleşen reolojiye sahiptir. Taze durum özellikleri tutarlılık, stabilite ve işlenebilirlik, su /çimento oranı, katkı maddeleri, köpük tipi ve yoğunluğundan etkilenir (Chica and Alzate 2019). Ayrıca, su/çimento oranındaki bir artış ve köpük içeriğinin azalması, plastik yoğunluğunu orantılı olarak artırır ve köpüklü betonun kıvamını ve reolojisini azaltır. Köpüklü betonun kıvamının, yüksek miktarda hava içeriği nedeniyle köpük içeriği eklendiğinde azaldığı, süper akışkanlaştırıcıların eklenmesinin akış süresini azalttığını belirtilmiştir. Reolojiyi ve taze köpürtülmüş betonun kıvamını etkileyen diğer bir önemli faktör, karışım tasarımındaki su içeriğidir. Suyun çimento oranının asgariye indirilmesi önerilmiştir, çünkü aşırı su hacmi döküm sırasında işlenebilirlik performansını etkiler köpük betonun hava kabarcıklarının ayrılmasına neden olabilmektedir (Amran *et al.* 2015).

Nambiar and Ramamurthy (2007), yaptıkları çalışmada köpük betonda hem çimento-kum hem de çimento-kum-uçucu kül karışımları için, köpük betonun yoğunluğundaki bir azalmayla (köpük hacmindeki artış) gözeneklilikte bir artış olsa bile, su emme görünür bir azalma gösterdiğini belirtmişlerdir. Bunun, yapay gözeneklerin hepsinin su emiliminde yer almadığını, havanın sürüklenen hava boşluklarında sıkışıp kaldığından, hepsinin birbirine bağlı olmadığını gösterdiğini söylemişlerdir. Köpük hacmi arttıkça, sürüklenen hava gözenek hacminin artması kılcal gözeneklerin hacminde bir azalmaya neden olur ve böylece su emiliminde bir azalma eğilimi gösterdiğini belirtmişlerdir.

Hücre sel betonun dayanım-yoğunluk ilişkisinden daha karmaşık olması, hidrasyon ısısının anlaşılmasıdır. Çünkü hücre sel betondaki ısı oluşumu normal ağırlıktaki betonlarda olduğundan daha fazla parametreden etkilenmektedir. Birim hacim başına ısı kapasitesi büyük ölçüde yoğunluk, agrega tipi ve miktarından etkilenir. Köpük beton geleneksel betona göre daha geniş bir değişkenliğe sahiptir. Köpük betondaki yüksek hava hacmi nedeniyle, hidrasyon ısısı kolayca dağılmaz ve beton içinde yüksek sıcaklık oluşturur. Bu etki yoğunlukla ters orantılıdır.

Mevcutta kullanılan hidratasyon modellerinin, hücresel betona uygulanabilir olup olmadığını, hidratasyon süreçleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilecek eşsiz termal karakteristikleri ve yoğunlukları nedeniyle incelemek için daha fazla araştırma yapılması gerekir (Panesar 2013).

Nambiar and Ramamurthy (2007), yapmış oldukları çalışmada Uçucu külün köpük betona bir dolgu maddesi olarak dahil edilmesinin, hava boşluklarının ince kumdan daha düzenli dağılımını sağlamaya yardımcı olduğunu ve uçucu kül daha ince olmasından dolayı her bir kabarcık üzerinde iyi ve düzgün bir kaplama sağlayarak ve birleşme ve üst üste binmelerini önleyerek hava boşluklarının düzgün bir şekilde dağılmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Daha dar hava boşluklu boyut dağılımı olan karışımların daha yüksek dayanım gösterdiğini ve daha yüksek köpük hacminde, kabarcıkların birleşmesinin daha büyük boşluklar oluşturduğunu söylemiş, boşluk boyutlarında geniş dağılım ve düşük dayanım ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Jones *et al.* (2015), Köpük beton kararsızlığının altında yatan nedenin, baloncukların yüzdürme kuvveti olarak kabul edildiğini, bunun da taze bir karışımdan çıkmalarına ve nihayetinde gaz ve katı fazların tamamen ayrılmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Yüzdürme kuvvetinin, doğrudan kabarcık büyüklüğü ile ilişkili olduğunu ve bunun düşük yoğunluklarda önemli ölçüde daha büyük hale geldiğini; sonuç olarak daha büyük kabarcıklar daha çok yüzer ve bu nedenle düşük yoğunluklu karışımlar kararsızlığa daha yatkın olduğunu belirtmişlerdir. Bunun, düşük yoğunluklu karışımlarda hava içeriği fraksiyonu arttıkça, katıların neden olduğu “hapsetme” kuvvetinin azaldığı gözlemiyle açıklandığını söylemişlerdir.

Liu and Zhang (2017), köpük betonda hacim dengesizliği araştırmışlardır. Karışım içerisindeki hapsedilen hava boşluğunun basıncında bir değişiklik olmazsa, hacim kararsızlığı oluşmayacağını savunmuşlardır. Yaptıkları deneylerde iki hacim hacim dengesizliği olgusu ile karşılaşmışlardır: i. Karıştırdıktan sonra, çökme olayı 30 dakika içinde ortaya çıkmıştır, bunun başlıca nedeninin, harcın kabarmadan sonra genleşmeyi durdurması olduğunu belirtmişlerdir. Bu zamanda, baloncukların iç ve dış basınçları dengeyi koruduğunu ve macunun denge aşamasında olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte karışım harcı çok seyreltilmiş veya çok kalın olduğunda ve kabarcık tamamen kapatılamadığında balondaki basınç, atmosfer basıncıyla bağlanır, hava sızar ve hızlı çökmeye neden olduğunu söylemişlerdir. ii. Karıştırdıktan sonra, yaklaşık 2 saat sonra çökme olayı gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Bunun sebebi olarak

macunun ağırlığının, kabarcık ve kabarcık yüzeyi viskoz kuvvetinin toplam basıncından daha yüksek olduğunu, bu nedenle gözenek patlaması çökme olayının gerçekleştiğini belirtmişlerdir.

Davraz vd. (2015), Köpük betonun kuru yoğunluğunun azalmasıyla orantılı olarak basınç dayanımının da azaldığını belirtmişlerdir. Farklı köpük beton tasarımları için, çimento dozajı, su/çimento oranı ve agrega türü sabit kalmak koşuluyla, kuru yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi yaklaşık doğrusal fonksiyonla tanımlamanın, dolayısıyla hedeflenen kuru yoğunluğa bağlı olarak basınç dayanımını yüksek bir kestirimle tahmin etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir.

(Ramamurthy *et al.* 2009), köpük betonun üretim yöntemleri, taze ve sertleşmiş özellikleri üzerine yapılan bilimsel araştırmaları gruplandırmışlardır (Çizelge 2.3).

**Çizelge 2.3** Köpük beton üretim metotlarının yoğunluk ve basınç dayanımına etkisi.

Yazar(lar) ve Yıl	Çimento Dozajı Bileşenler	k/c	s/c	UK/c	Yoğunluk Aralığı (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa, 28g)
McCormick (1967)	335-446	0,79-2,8	0,35-0,57		800-1800	1,8-17,6
Tam vd. (1987)	390	1,58-1,73	0,6-0,8		1300-1900	1,81-16,72
Regan ve Arasteh (1990)	Hafif agregalı	0,6	0,45-0,6		800-1200	4-16 0,6-10 (91gün)
Van Deijk (1991)	Çimento, kum, UK				280-1200	
ACI 523.1R-1992	Çimento hamuru				240-640 (KY)	0,48-3,1
	Çimento-kum				400-560 (KY)	0,9-1,72
Hunaiti (1997)		3			1667	12,11
Kearsly ve Booyens (1998)	Çimento - UK (yerdeğiştirme)				1000-1500	2,8-19,9
	270-398	1,23-2,5	0,61-0,82		982-1185 (KY)	1-6 3-15
Durack ve Weiqing (1998)	137-380		0,48-0,7	1,48-2,5	541-1003 (KY)	(77gün)
Aldridge (2000)	Çimento - kum				400-1600	0,5-10
Kearsly ve Wainwright (2001) '	Çimento ve UK				1000-1500	2-18
	Çimento, 149-420		0,4-0,45		490-660	0,71-2,07
Tikalsky vd. (2004)	Çimento, kum/UK 57-149		0,5-0,57		1320-1500	0,23-1,1
	300	1,83-3,17	0,5		1000-1400	1-2
Jones ve McCarty (2005)			1,11-1,56	1,22-2,11	1000-1400	3,9-7,3
	500	1,5-2,3	0,3		1400-1800	10-26
Jones ve McCarty (2005)			0,65-0,83	1,15-1,77	1400-1800	20-43
	Çimento-kum (kaba)				800-1350 (KY)	1-7
Nambiar ve Ramamurthy (2006)	Çimento-kum (ince)	1 'den 3 'e değişen filler /c oranlı ve %0 - %100 UK yer değişimli			800-1350 (KY)	2-11
	Çimento-kum -UK				650-1200 (KY)	4-19

Not: k/c : Kum/çimento s/c : su/çimento UK/c : Uçucu kül/çimento KY : Kuru yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)

Bu yaptıkları çalışmada çimento dozajı, kum/çimento oranı, su/bağlayıcı madde oranı, uçucu kül/çimento oranı ve yoğunluğun basınç dayanımını ne derecede etkilediğinin bilgileri derlenmiştir.

## 2.5 Konuyla İlgili Çalışmalar

Şahin vd. (2018), H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılarak havalandırılan alkali aktif cüruf bazlı hafif pastaların üretimi ve farklı kütleme koşulları altında kürlenmiş örneklerin fiziksel, mekanik ve ısı özelliklerini araştırmışlardır. Karışım bileşimlerini oda sıcaklığında değiştirerek geniş bir görünür yoğunluk aralığında H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanarak alkali aktive cüruf numunelerinin havalandırılması yoluyla hafif betonlar üretilebileceğini belirtmişlerdir. Taze karışımların genleşme mekanizmasını araştırmak ve bunların görünür yoğunluk üzerindeki etkilerini araştırmak için çeşitli su-cüruf oranları ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriklerini kullanılmışlardır. Üretilen örnekler, 516-1199 kg/m<sup>3</sup> görünür yoğunluk aralığında ve 0,5-30,0 MPa basınç dayanımına sahip olup, havalandırılmış numunelerin ısı iletkenlikleri, 480-1098 kg/m<sup>3</sup> kuru yoğunluk aralığında 0,117 ila 0,206 W/m.K arasında değiştiğini saptamışlardır. Burada numunelerin görünür yoğunluğunu doğrudan etkileyen karışımların genişlemesi, su/çimento oranı ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Esas olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği hava kabarcıklarının oluşum miktarını ve oranını etkilediğini, doğrudan su içeriğinin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ayrışma hızı, tutarlılık, ayar süresi, pH ve taze karışımın sıcaklığı gibi çeşitli parametreleri etkilediğini ve verimli genişleme sağlayabilmesi için bu parametrelerin karşılıklı ilişkilerine bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Liu and Zhang (2017), Köpük beton hacim dengesizliği, etki faktörleri ve çökme ve çökmenin ortaya çıkmasının ana nedenleri incelenmişlerdir fakat çözüm bulamamışlardır. Deneyde Portland çimentosu ve düşük kalsiyum uçucu kül (ASTMC 618-03 2003' e göre F sınıfı bir uçucu kül) kullanmışlardır. Köpük ajanı olarak kütle olarak %27,5 konsantrasyonlu hidrojen peroksit çözeltisi, köpük stabilizatörü, stearik asit tuzu serisine (CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COO<sub>2</sub>Ca) ait Kalsiyum stearat kullanılmışlardır. Kesme gerilmesinin macunda gaz genleşmesi sona erdiğinde 25 Pa ile 40 Pa arasında olması gerektiğini, bu sırada sıcaklığın yaklaşık 58 °C ve su/çimento oranı 0,54~0,58 olması ve 2 saat içinde nihai kayma gerilmesinin 75 Pa'nın üzerinde macun sıcaklığı 43 °C'den az olmaması gerektiğini söylemişlerdir. Uçucu kül katkısının hacim stabilitesine yardımcı olduğunu saptamışlardır. Son olarak 0,5~0,6'lık su / çimento oranının, çimento içeriğinin %2'sinin hızlandırıcı ve %1,6 çimento içeriğinin köpük dengeleyicisinin hacim dengesi üzerinde olumlu etkisinin olduğunu söylemişlerdir.

Li *et al.* (2019), Bağlayıcı malzeme olarak Magnezyum fosfat çimentosu ve köpük ajanı olarak hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) kullanarak köpük beton üretmişlerdir ve bu malzemenin özelliklerini araştırmışlardır. Karışım dizaynlarında farklı oranlarda magnezyum oksit (MgO), amonyum

dihidrojen fosfat (ADP), boraks (B), hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ), kalsiyum stearat (CS), mangan dioksit ( $MnO_2$ ) ve su ( $H_2O$ ) kullanarak 300-1000  $kg/m^3$  arasında değişen kuru yoğunluklarda köpük beton üretmişlerdir. Hazırlanan köpük betonların yirmi sekiz günlük basınç dayanımı ve ısı iletkenliği sırasıyla 1,8-21,6 MPa, 0,136-0,347 W/m.K. aralığında bulmuşlardır. MPC ile üretilen köpük betonu, belirli bir kuru yoğunluk veya belirli bir termal iletkenlik için, portland çimentosu ile elde edilen köpük betonu ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir basınç dayanımına sahiptir olduğunu vurgulamışlardır. MPC köpük betonunun yedi günlük basınç dayanımı, yirmi sekiz günlük basınç dayanımının yaklaşık %80' ini oluşturduğunu saptamışlardır.

Ducman and Korat (2016), İki farklı köpük ajanı, alüminyum (Al) tozu ve hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) kullanarak köpürtme özelliğini karşılaştırmış, prizini tamamlamış köpük betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmiş ve bu sistemlerdeki gözeneklilik gelişimini izlemişlerdir. Her iki köpürtme katkı maddesinin, yani Al tozu ve  $H_2O_2$ , araştırılan jeopolimer matrisi için başarılı köpürme ajanları olduğunu kanıtlamışlardır. Alüminyum tozu kütlece %0,07, 0,13 ve 0,20 hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ise kütlece %0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 oranlarında kullanılarak uçucu kül jeopolimer matrisine eklenerek numuneler üretmişlerdir. Al tozu ilavesi ile yoğunluk değişimi 0,64 ile 0,74  $g/cm^3$  arasındayken  $H_2O_2$  ilavesi ile 0,61 ile 1,00  $g/cm^3$  arasındaki yoğunluklarda gözenekli bir yapı elde etmişlerdir. Üretilen numunelerin ölçülen basınç dayanımlarını, Al tozu ilave edilenler için 3,3 ile 4,3 MPa aralığında ve  $H_2O_2$  eklendiğinde 2,9 ile 9,3 MPa aralığında bulmuşlardır. Ölçülen basınç dayanımlarını, yoğunlukla doğru orantılı bulmuşlardır yoğunluk arttıkça basınç dayanımının da arttığını gözlemlemişlerdir. Her iki katkı maddesinde, gözeneklerin numuneler boyunca düzgün bir şekilde dağıldığı bulundu. Alüminyum tozu ilave edilmiş olan örneklerde,  $H_2O_2$  eklenmiş örneklerden daha büyük gözeneklere sahip olduğu saptanmıştır. Her iki köpürtme ajanı daha yüksek miktarda eklendiğinde, birleşme nedeniyle gözenek sayısının azaldığını doğrulamışlardır. Bununla birlikte, bu gözeneklerin hacmi de artmış ve en iyi karışımlar %58 ve %48'lik toplam gözeneklilik için sırasıyla Al tozu kütlece %0,2 ve  $H_2O_2$  kütlece %1 oranları ile elde etmişlerdir.

Huang *et al.* (2015), Portland çimentosu, uçucu kül, hidrojen peroksit ve kimyasal katkılar kullanılarak ultra hafif köpük beton hazırlamışlardır. Ultra hafif köpük betonunun özelliklerini etkileyen faktörleri incelemiş ve basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve köpük betonlarının görünür yoğunluğu arasındaki ilişkileri değerlendirmişlerdir. Deneylerde işlem sırası ilk olarak,

kullanılmak istenen bir sıcaklığa (35, 40, 45, 50, 55 °C) getirilen su dökülmüştür. Karıştırma kabına kademeli olarak çimento, uçucu kül, polipropilen lif, köpük dengeleyici emülsiyon ve koyulaştırıcı madde eklemiştirler. 210 saniye karıştırıldıktan sonra hidrojen peroksit karıştırma kabına dökülmüş, ardından 11 saniye yüksek hızda karıştırmışlardır. Daha sonra köpürme karışımı genleşme başlamadan hızlı bir şekilde yaklaşık %30'luk bir derinliğe değinceye kadar 36x36x46 cm ebatlarında kalıplara dökmüşlerdir. Çelik kalıpların iç taraflarına köpük betonlarının sıcaklığını korumak için 2 cm plastik tabakalar yerleştirmişlerdir. Köpürme işlemi tamamlandığında (yaklaşık 18 dakika), açığa çıkan üst yüzey, suyun buharlaşmasını önlemek için polietilen film ile kaplanmış ve daha sonra 2 cm'lik bir plastik tabaka ile kapatmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda 100-300 kg/m<sup>3</sup> görünür yoğunlukta ultra hafif köpük betonları başarıyla üretmişlerdir. Ultra hafif köpük betonun hazırlanmasında köpük dengeleyici emülsiyon ilave edilerek çökme ve hava boşluklarından kaçınma önenebileceğini vurgulamışlardır. Köpük beton üretiminde optimum köpüklenme sıcaklığı ve su-çimentolu malzemelere oranının sırasıyla 45 °C ve 0,55 olarak belirtmişlerdir.

Masi *et al.* (2014), düşük yoğunluklu jeopolimerlerin sentezlenmesi için farklı köpükendirme teknikleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Düşük yoğunluklu jeopolimerlerin nihai özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için karışıma katılacak olan alüminyum tozu ve hidrojen peroksit'in değişen konsantrasyonlarının etkilerini araştırmışlardır. Köpürtme ajanları için alkali aktivatörü olarak sodyum alüminat çözeltisi kullanılmışlardır. Karışımlarda ağırlık olarak kütlece %0,01 ile %0,05 arasında alüminyum tozu konsantrasyonunu ve hidrojen peroksit konsantrasyonunu ağırlık olarak kütlece %0,1 ila %0,4 oranlarında eklemiştirler. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun arttırılması, yoğunluğun azalmasına neden olduğunu saptamışlardır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ağırlıkça %0,4'e yükselttiklerinde gözeneklerin çoğu çökmüş ve yoğunluk 1,40 g/cm<sup>3</sup>'e yükselmiştir. Ağırlık olarak %0,1 hidrojen peroksit içeren köpüklü numuneler, çapı 200 um olan homojen bir makro gözenek dağılımı gösterdiğini bulmuşlardır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmesi, hala numunede iyi dağılmış olan 8-10 mm'ye kadar gözeneklere yol açtığını saptamışlardır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun arttırılması, basınç dayanımında bir azalmaya yol açmış olduğunu belirtmişlerdir. Yoğunluk ve basınç dayanımı değerlerini sırasıyla 0,52-1,41 g/cm<sup>3</sup> ve 3,0-5,2 MPa olarak ölçmüşlerdir. Alüminyum tozu konsantrasyonunun ağırlıkça %0,01'in üzerine çıkarılmasının, reaksiyonun yüksek hızı ve gözenek çökme eğiliminin artması nedeniyle fiziksel ve mekanik özelliklerin aynı şekilde eşit olmadığını saptamışlardır. Ağırlıkça %0,05'lik alüminyum tozu numunesi için reaksiyon çok hızlı olmuş ve gözeneklerin çoğu döküm sırasında çöktüğünü, yoğunluğun ise 1,42 g/cm<sup>3</sup>'e arttığını gözlemlemişlerdir. Diğer tüm

numuneler  $1,0 \text{ g/cm}^3$ 'ten daha düşük bir yoğunluk ve 1,7 ile 2,4 MPa arasında basınç dayanımı değerlerini elde etmişlerdir. Alüminyum tozu ile oluşturulan gözeneklerin genellikle kaba olduğunu ve yüksek katkı maddesi konsantrasyonlarında düzgün bir şekilde dağılmadığını gösterdiğini ve numunelerin çoğunun,  $500 \text{ }\mu\text{m}$  ile  $3500 \text{ }\mu\text{m}$  çapında makro gözenekler sergilediğini belirtmişlerdir.

Fiziksel ve mekanik özelliklerin, su veya nemin köpüklü betona aktarılmasından sonra büyük ölçüde bozulacağı bilinmektedir. Ma and Chen (2016), sıradan Portland çimentosu ve yaklaşık potasyum trimetilsilanolat (PT), kalsiyum stearat (CS) ve siloksan bazlı polimer (SP) içeren üç çeşit su itici madde kullanılarak yaklaşık  $550 \text{ kg/m}^3$ 'lük bir düşük yoğunluklu köpüklü bir beton hazırlamışlardır. Köpüklü betonun 7 günlük ve 28 günlük basınç dayanımı, termal iletkenlik, sorptivite ve higroskopiklik içeren potasyum trimetilsilanolat (PT), kalsiyum stearat (CS) ve siloksan bazlı polimer (SP) içeren mekanik ve fiziksel özellikleri sistematiktir. Su itici, köpük stabilitesi ve düşük yoğunluklu köpüklü betonun kuru yoğunluğu üzerinde çok az bir etkiye sahip olup sıkıştırma mukavemeti su itici ilavesiyle de geliştirilebilir ve optimum iyileştirme genellikle %1,0 su itici içeriğinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Aynı su itici içeriği kullanıldığında, SP tarafından değiştirilen köpüklü betonun 48 saatlik su emmesi en düşüktür ve köpürtülmüş betonun %1,0 SP ile 48 saatlik su emmesi hacimce %2,5 olduğunu bulmuşlardır. Su itici katkının uygulanması, köpürtülmüş betonun higroskopik nem içeriğini azaltabileceğini belirtmişlerdir. PT ve CS %0,2' den %1,2' ye yükselirken nem içeriğinin yavaşça azaldığını ve artan SP içeriği ile %0,2' den %1,2' ye yükselirken PT ve CS' ye kıyasla daha az azalır. Su itici maddenin su ve nem emilimindeki etkilerinin farkı, gözenek yüzeyi ile sıvı su veya su buharı arasındaki yapışkan kuvvet değerleri ile açıklanabildiğini söylemişlerdir.

Tan *et al.* (2016), Farklı karışım miktarlarında uçucu kül, uçucu kül aktivatörü, su/çimento oranı ve köpük yapıcı maddenin köpük betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapmış olduğu deneylerde Uçucu kül aktivatörü olarak CaO, köpürtme ajanı %27,5 konsantrasyonunda hidrojen peroksit ve köpürtme katalizörü  $\text{MnO}_2$  kullanmışlardır, burada hidrojen peroksit yapım işlemi sırasında oksijen gazı oluşturmak için katalizörle ( $\text{MnO}_2$ ) reaksiyona girdiğini belirtmişlerdir. Su varlığında uçucu külün CaO ile reaksiyona girebilip, hidratlanmış kalsiyum silikat oluşturması ve ekstra dayanım sağlanacağı üzerinde durmuşlardır. Karışımın yoğunluğunun, köpürme hızı, karışımın yoğunlaşma hızı, ilave hidrojen peroksit miktarı ve diğer etkileme faktörlerine bağlı olduğunu ve göreceli olarak yüksek kaliteli bir ürün hazırlamak için karıştırılma presodürlerinin önemini vurgulamışlardır. Uçucu kül içeriği

%45'ten küçük olduğunda ürün mukavemeti orta derecede azalırken, uçucu kül içeriği %45' ten büyük olduğunda ürün mukavemeti hızla azaldığını ve uygulanabilirlik bu ultra hafif köpük beton sistemindeki uygun karışım uçucu kül miktarının %45' i geçmemesi gerektiğini söylemişlerdir. Uçucu kül aktivatörünün (CaO) karışım miktarı %2,5' ten fazla olduğunda, köpük betonun basınç dayanımı artış seviyesi düşme eğiliminde olduğunu ultra hafif köpük beton sisteminde uygun miktarda uçucu kül aktivatörü miktarı %2,5 olduğunu saptamışlardır. Son olarak su/çimento oranının 0,45 ve kütlece %3,5' luk hidrojen peroksit köpürtme katkısının üretilen numunelerin gözenek duvarı kalınlığı ve gözenek yapılarına uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Hilal vd. (2015), Hava boşluğu büyüklüğü ve şekli parametrelerini karakterize ederek ve bu parametrelerin etkisini ve çimento macunu mikro yapısındaki kuvveti değiştiren değişiklikleri belirleyerek, farklı katkı maddelerinin köpük betonu üzerindeki etkisinin araştırmışlardır. Önceden oluşturulmuş bir köpük kullanılarak farklı karışımlar düzenlemiş, ayrı ayrı veya birlikte kullanılan katkı maddeleri; silis dumanı, uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcılar ile değişen yoğunlukta nominal olarak 1300, 1600 ve 1900 kg/m<sup>3</sup> aralığındaki köpük betonlar üzerinde inceleme yapmışlardır. Sonuç olarak Tüm karışımlar için, artan yüksek köpük hacimlerinin daha büyük bir boşluk derecesinde birleşmeye neden olduğunu, bunun da büyük miktarda düzensiz boşluklara, geniş bir boşluk dağılımına ve daha düşük basınç dayanımıyla sonuçlandığını belirtmişlerdir. Belirli bir yoğunluk için karışımlardaki katkı maddelerinin boşluk sayılarının artmasına yol açmasına rağmen, boşlukların ve bağlantıların azalması nedeniyle, birleştirilmelerini önleyerek ve dar bir boşluk ebadı dağılımını sağlayarak daha yüksek mukavemet sağlandığını saptamışlardır. Süper akışkanlaştırıcı katkılarının tek başına kullanıldığında boşluklar üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu ve diğer katkı maddeleri uçucu kül, silis dumanı ile birlikte kullanıldığında boşluk yapısını hem bireysel hem de kombinasyon halinde özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Awang *et al.* (2012), Önceden üretilmiş köpük, çimento, uçucu kül, kireç ve polipropilen elyaf lifi karışımlarından 600, 1000 ve 1400 kg/m<sup>3</sup>' lük köpük beton numuneleri üretmiş mekanik ve ısı özellikleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Tüm karışımlarında 1:1,5 sabit çimento-kum oranı ve 0,45 su/çimento oranlarını kullanmışlardır. Farklı yoğunluklardaki köpük betonların farklı mekanik özelliklerini verdiğini vurgulamış ve düşük köpük beton yoğunluğunun düşük mekanik özellikler sağladığını ancak daha fazla mikro gözenekliliğin sağlanmasından dolayı termal olarak iyi olduğunu söylemişlerdir. Uçucu külün puzolanik reaksiyonlar meydana

geldikçe hem basınç hem de eğilme dayanımını daha uzun kürlenme sürelerinde arttırdığını ve uçucu külün küçük ebat ve gözenek dağılımının eşit dağılımında yardımcı olup, her gözenek ve boşluk yapılarının daha iyi bir güç elde etmelerine yardımcı olacağını söylemişlerdir. Kireç ilavesinin mekanik olarak fazla bir katkı sağlamasa da puzolanik reaksiyonun hidratlanmış kireç varlığında hızlanmasının köpük betonun erken dayanım kazanmasına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Polipropilen liflerin hidrofobik karakterizasyona sahip olmasından dolayı köpük betonda daha fazla gözenek ve boşluk ürettiğini ve bunun basınç dayanımını etkileyeceğini söylemişlerdir. Liflerin yüksek yoğunluklarda mukavemet gelişimine katkıda bulunmayacağını, düşük yoğunluklarda ise basınç dayanımına katkı sunacağını savunmuşlardır.

Kuzuelova *et al.* (2016), Önceden oluşturulmuş köpük bir dizi köpük betonu hazırlamak için farklı hacimlerde sıvı köpük ve sabit su-çimento oranı (0,55) kullanılarak köpük betonda köpük ajanı konsantrasyonunun etkisi ve bunun mikrodalga ve ultrasonik işlemi, köpük stabilitesi, kütle yoğunluğu, mikro yapı ve sonuçta ortaya çıkan basınç dayanımı açısından incelenmişlerdir. Burada köpük üreticisi kullanılarak üretilen protein köpük katkı maddesi, su ve havadan oluşan sıvı köpükler, portland çimentosu-su süspansiyonları ile karıştırılmış ve Daha düşük mikrodalga ve ultrasonik işlem görmüş köpük ajanı konsantrasyonu ile hazırlanan numunelerde basınç dayanımı iyileşmesini sağlayan azalmış gözenek büyüklüğü belirlemişlerdir. Düşük köpürme ajanı konsantrasyonunun kendisinin de köpüğün dengesi üzerinde olumlu etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Düşük konsantrasyonda köpürme ajanı kullanılması, köpük stabilitesini arttırmış, hidratasyon reaksiyonu üzerindeki geciktirici özelliklerini bastırmış ve ayrıca hidratasyonu hızlandırmıştır.

Pan *et al.* (2014), 150 kg/m<sup>3</sup> ile 300 kg/m<sup>3</sup> arasındaki kuru yoğunluğa sahip düşük yoğunluklu köpük betonun hazırlanmış ve bu köpük betonların karakterizasyonu ile ilgili deneysel araştırmalar yapmışlardır. Karışımlarda geleneksel portland çimentosu, yüksek fırın cürufu, köpürtme ajanı olarak hidrojen peroksit ve çimento karışımının bulamacının su/bağlayıcı oranını mümkün olduğu kadar azaltmak için süper akışkanlaştırıcı belli oranlarda kullanmışlardır. 150 kg/m<sup>3</sup> ile 300 kg/m<sup>3</sup> arasında farklı düşük yoğunluğa sahip köpük beton numunelerinin, köpükleme maddesi dozajının uygun şekilde değiştirilmesiyle elde edilen bazik karışım oranına dayanarak başarılı bir şekilde hazırlanabileceğini belirtmişlerdir. Karışım materyallerinin karışıma katılma sırasının ve karışım hız seçimini içeren uygun karıştırma prosedürün, doğru karışım oranı kontrolünün yanı sıra köpük betonun başarılı bir şekilde

hazırlanması için dikkatle takip edilmesinin önemini vurgulamışlar. Karışıma hidrojen peroksit dışındaki malzemelerin katılıp normal hızda karıştırılıp homojen hale geldikten sonra hidrojen peroksit ilavesi yapıp 30 saniye hızlı bir karıştırma yapıp köpürme işlemi başlamadan karışımın kalıba alınmasının üzerinde durmuşlardır. Süper akışkanlaştırıcının uygun şekilde arttırılmasının ve yüksek fırın cürufu katkısının uygun şekilde eklenmesinin, köpük betonun mukavemet özelliğini iyileştirildiğini saptamışlardır. Çatlama olayının köpük betonun priz alma sürecinde oluşan hidrasyon ısısının neden olduğu sıcaklık farkı ve köpük betonun düzensiz hacimli değişimi sebebiyle oluştuğunu savunmuşlar ve köpük betonda olası çatlama durumlarının polipropilen lif ilavesi ve %15-20 yüksek fırın cürufu tozu ile kısmi çimento değişimi ile kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir.



### 3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri ve uygulanan yöntemler bu bölümde sunulmuştur.

#### 3.1. Malzeme Bileşenleri

Köpük betonun oluşturan harç bileşenleri; genişletirici katkıları, bağlayıcılar, su, agrega, mineral ve/ya puzolanik katkıları ve gerektiğinde kimyasal katkılarıdır. Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento, ince kum, uçucu kül, kireç, polipropilen lif (PPL), hidrojen peroksit, malzemelerinin özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

##### 3.1.1 Çimento

Hazırlanan harçlarda bağlayıcı malzeme olarak Afyon Çimento Sanayi üretimi CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. TS EN 197-1 standartına uygun CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri.

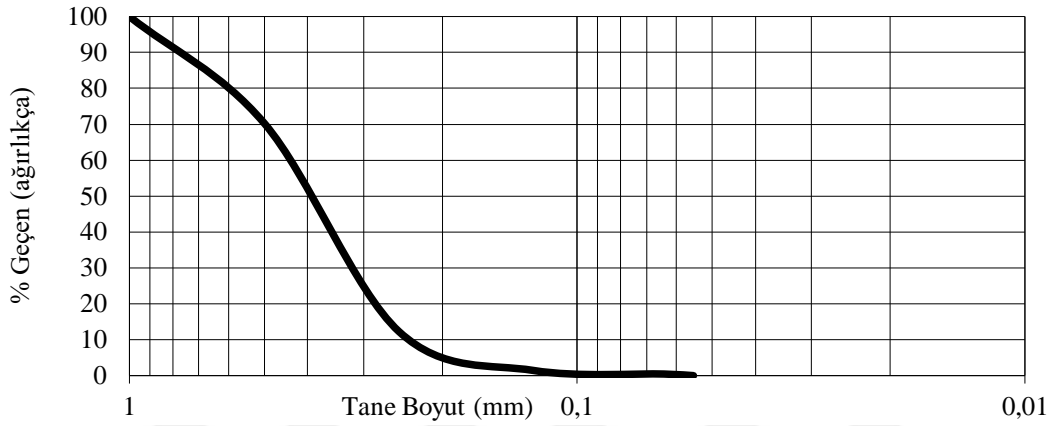
Analiz Grubu	Deney	Sonuç
Fiziksel Özellikler	Kıvamlilik suyu (%)	30
	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)	3685
Priz süresi	Başlama (saat-dak)	2sa.52dak
	Sonu (saat-dak)	4sa.36dak
	Yoğunluk (kg/dm <sup>3</sup> )	3,07
Basınç Mukavemeti (N/mm)	2 gün	26,5
	7 gün	38,7

**Çizelge 3.2** CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri.

Oksit	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl-	Serbest CaO
(%)	64,13	18,48	4,40	3,12	1,35	0,44	0,78	3,51	0,006	1,34

### 3.1.2 Kum

Elenmiş ve yıkanmış doğal kuma ait tane boyutu analiz grafiği Şekil 3.1’de verilmiştir. Tane boyutu analizine göre göre 1mm’lik elekten %100 geçmiştir. İnce kum görünümü Resim 3.2’de verilmiştir. Kumun  $d_{50}=0,40$  mm’dir.



**Şekil 3.1** İnce kuma ait tane boyutu analiz grafiği.



**Resim 3.1** Çalışmada kullanılan ince kum.

Kum içerisinde parçacıklar halinde dağılmış olan çürümüş bitki köklerindeki ve diğer organik maddelerdeki tannik asit ve türevleri, köpük beton yapımında, çimentonun prizini yavaşlatmaktadır. Organik maddelerin miktarı çok fazla olduğunda, katılma meydana gelmeyebilmektedir. Bu nedenle, organik maddeler köpük betonun özellikle ilk günlerdeki dayanımı başta olmak üzere, beton dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz etkilemektedir (İnt. Kyn.3). Agreganın içerisinde betona zarar verebilecek kadar organik madde bulunup bulunmadığı TS 1744-1 ve TS 3820 no.lu standartlarda belirtilen yöntemlerle araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılacak olan kumdan 500 g numune alınmış ve ölçü silindirin 180 mL işaret çizgisine kadar doldurulmuştur. Üstüne 200 mL işaret çizgisine denk gelene kadar %3'lük sodyum hidroksit çözeltisi ilave edilip, ölçülü silindirin ağzı kapatıldıktan sonra tanelerin arasından koyu renk bulutları çıkmayınca kadar devam edilmiştir. Ölçü silindiri içerisindeki karışım çökmesi için 24 saat dinlendirilmiştir.

Deney iki ayrı numuneye uygulanmıştır. 24 saat beklendikten sonra ölçülü silindirindeki sıvının üzerindeki renk takip edilir. Ölçü silindirlerinin içindeki agregaların üzerindeki sıvı her iki ölçü silindirinde de renksiz veya açık sarı ise, zararlı oranda organik madde bulunmadığına karar verilir. Ölçü silindirinden herhangi birinin içinde koyu sarı, kahverengi veya kırmızımsı bir renk oluşmuş ise zararlı oranda organik madde bulunduğu karar verilir (Çizelge 3.3).

**Çizelge 3.3** Agrega organik madde referans renkleri (İnt.Kyn. 4).

Eriyik Rengi	Organik Madde	Agreganın Kullanımı
Renksiz veya çok açık sarı	Hiç yok veya çok az var.	Kaliteli, beton üretiminde kullanılabilir.
Safran sarısı	Az miktarda var	Normal işler için uygundur.
Belirgin kırmızı	Var.	Önemsiz işlerde kullanılabilir.
Belirgin kahverengi	Çok var	Kullanılmaz.

Organik Kökenli Maddeler: Sodyum Hidroksit ile yapılan deneyde sıvı renginin 0-1 Referanslar arası (Çok iyi) olduğu belirlenmiştir.

İnce agregada ASTM D4373-79 standartında belirtilen yöntem ile CaCO<sub>3</sub> tayini deneyi yapılmıştır. Çalışmada kullanılacak olan herhangi bir kesitinden belli miktarda kum karışım yapabilmek için cam üzerine koyulur. Derişik hidroklorik asit, kumun tamamını örtecek şekilde

dökülür. Kumdaki kaynama ve gaz kabarcıklarının oluşup oluşmadığı gözlenir. Gaz kabarcıklarının az veya çok oluşuna göre, kumun kullanılıp kullanılmayacağına karar verilir.

Sonuç olarak HCl ile işlem sonrası bünyede herhangi bir reaksiyon (köpürme vb.) gerçekleşmemiştir. Buna göre silisli yapıda olduğu değerlendirilmiştir.

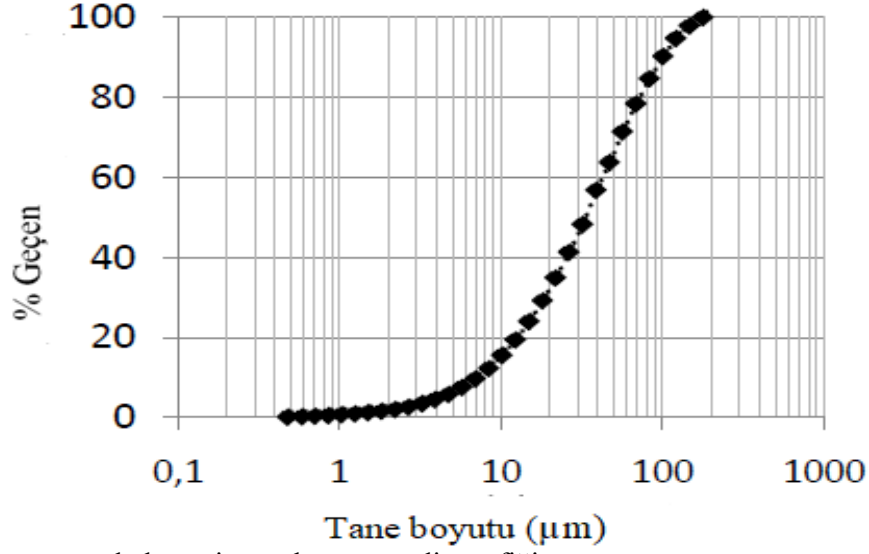
### 3.1.3 Uçucu Kül

Çalışmada puzolanik katkı olarak özel bir beton santralinden alınan uçucu kül tercih edilmiştir. Uçucu külden alınan kül numunesinin Afyon Kocatepe Üniversitesi laboratuvarında kimyasal analizi yapılmıştır. Kimyasal analiz sonuçlarına göre külün ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) toplamı %70'in altında olup CaO oranı ise %15,3 olarak belirlenmiştir. Kullanılan kömür cinsine bağlı olarak bazı UK'lerde önemli oranda CaO bulunmaktadır. CaO miktarı %10'un altında olan UK'ler, düşük kireçli veya düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli veya yüksek kalsiyumlu UK olarak adlandırılmaktadır. ASTM C 618'e göre UK'ler, S+A+F toplamı %0'in üzerinde ise F sınıfı UK, S+A+F toplamı %50'nin üzerinde ise C sınıfı UK olarak gruplandırılmaktadır. Buna göre çalışmada kullanılacak olan uçucu külün ASTM C618'e göre (C) sınıfı uçucu kül olduğu belirlenmiştir (Çizelge 3.4). Uçucu kül  $d_{50} = 65,71$ ,  $d_{90} = 87,14$   $\mu\text{m}$ 'dir.

**Çizelge 3.4** Soma uçucu külünün kimyasal yapısı.

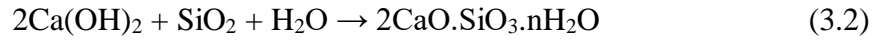
Oksit	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{SO}_3$	Cl-	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{TiO}_2$	MnO
%	40,3	5,12	20,90	15,3	1,19	0,27	1,83	2,35	0,01	0,23	0,75	0,053

Soma uçucu külünün tane boyutu analizi Lazer tane boyutu analiz cihazı ile yapılmış olup tane boyutu grafiği Şekil 3.2'te sunulmuştur.



Şekil 3.2 Soma uçucu külüne ait tane boyutu analiz grafiği.

Çimentonun hidrasyonu ile CSH Jelleri oluşur ve kalsiyum hidroksit (CH) aşığa çıkar, kimyasal denklemi (3.1a), (3.1b.)’ de verilmiştir. Reaksiyonun ilerleyen sürecinde (CH) ile puzolanik malzeme (uçucu kül) reaksiyona girerek mukavemeti sağlayan yeni CSH faz yapıları üretir, kimyasal denklemi (3.2)’ de verilmiştir.



Resim 3.2 Çalışmada kullanılan uçucu kül.

### 3.1.4 Kireç

Kireç eski çağlardan günümüze kadar kullanılan ve farklı amaçlar için kullanılan bir hidrolik bağlayıcıdır. Eski mısır piramitlerinin inşasında, Yunan ve Roma imparatorluğu dönemlerinde farklı eserlerin yapımında kireç kullanıldığı bilinmektedir.

Kalsiyum karbonat içeren kireçtaşlarının 900-1000 °C de kalsinasyonu ile kireç (CaO) elde edilir. Kirece sönmemiş kireç de denir. Sönmüş kireç sönmemiş kirecin su ile reaksiyonu neticesinde oluşan kalsiyum hidroksittir (Ca(OH)<sub>2</sub>).

Kalsiyumlu kireç taşları % 97-99 CaCO<sub>3</sub> içerirler. Yüksek kalsiyumlu kireçtaşının kalsinasyonu kimyasal denklemi (3.3)' te verilen prensibe dayanır. Pratikte kalsinasyon 1050-1200 °C arasında yapılır.



Hidratasyon kimyasal denklemi (3.4)'de verildiği gibi gerçekleşmektedir.



Sönmemiş kirecin suyla tepkimesiyle, Kalsiyum hidroksit Ca(OH)<sub>2</sub> yani söndürülmüş kireç elde edilir. Burada kirecin karışıma katılmasıyla Ca(OH)<sub>2</sub>'nin uçucu külün puzalonik özelliğinin hızlandırılıp harcın prizini tamamladıktan sonra erken dayanım kazanımı hedeflenmektedir. Deneylerde Adaçal marka sönmemiş kireç kullanılmıştır. Kireç kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Tan *et al.* (2014), kirecin uçucu kül aktivatörü olarak karışım miktarının köpük beton dayanımı üzerine olan etkisini araştırmış, kirecin uçucu külü aktive etmek için kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Köpük beton numunesinin mukavemetinin, özellikle uçucu kül aktivatörünün miktarındaki artışla arttığını belirtmiştir. Uçucu kül aktivatörü kirecin karışım miktarı %2,5' dan fazla olduğunda, köpük betonun basınç dayanımı artışının azalma eğiliminde olduğunu saptamış ve uçucu kül aktivatörünün karışım miktarının optimum bir değere sahip olduğunu belirtmiştir. Uçucu kül aktivatörü miktarının kütlece %2,5 altında kullanılmasını önermiştir. Bu tez çalışmasında kireç kütlece %2 değerinde kullanılmıştır.

**Çizelge 3.5** Sönmemiş kireç kimyasal yapısı (İnt.Kyn.5).

Kimyasal Özellikler	
CaO Toplam	%94 - %97
CaO Aktif	%89 - %90
CO <sub>2</sub>	≤3
Asitte Çözünmeyen Madde	0,02 - 0,10
MgO	0,24 - 1,70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04 - 0,48
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04 - 0,48
SiO <sub>2</sub>	0,60 - 1,78
Ateş Zaiyatı	≤3



**Resim 3.3** Deneylerde kullanılan kireç

### 3.1.5 Hidrojen Peroksit

Hidrojen peroksit, köpük betonda kimyasal bir köpüklendirme maddesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek pH ve yüksek sıcaklık genellikle hidrojen peroksitin ayrışmasını katalize eder ve kalsiyum stereat çözeltilisinin ayrışma reaksiyonunun stabilize edilmesine yardımcı olduğu iyi bilinir.

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin ayrışması kimyasal denklemi (3.5)' de verildiği gibi su ve oksijen oluşturan ekzotermik bir reaksiyondur.



Sulu çözeltilerdeki hidrojen peroksit, su ve oksijene ayrıştırma yönünde güçlü bir eğilim gösterir. Reaksiyonun kimyasal hareketi pozitifdir, yani reaksiyon kendiliğinden gerçekleşir. Bununla birlikte, oda sıcaklığında ayrışma oranı, ölçülemeyecek şekilde küçüktür. Ancak, ayrışma hızı bir katalizör eklenerek önemli ölçüde arttırılabilir.  $Fe^{3+}$  iyonları, homojen bir katalizör için iyi bir örnek olup reaksiyon karışımı ile aynı yapıdadır (İnt.Kyn.6).

Hidrojen peroksit olarak bilinen  $H_2O_2$ , daha iyi oksitleyici özelliğe sahiptir. Seyreltilmiş  $H_2O_2$ , harç üzerinde stabilize kimyasal reaksiyon nedeniyle  $O_2$  oluşabilir. Detaylı reaksiyon ile ilgili formül denklem (3.5)' te sunulmuştur. Reaksiyona girerek gaz üretimi hızı  $FeCl_3$  ve kalsiyum stearat kullanımı ile kontrol edilebilir. Gözenek hacmi, köpük oluşturacak  $H_2O_2$ , çimento ve  $FeCl_3$ 'ün reaksiyonu ile sağlanır (Zhang *et al.* 2014, Ding and Ren 2011, Xulong and Qian 2011).

Halen,  $KMnO_4$ ,  $FeCl_3$ ,  $CuSO_4$ ,  $H_2O_2$  vb. katalizör olarak kullanılmaktadır. Mekanizma enerji bakımından değerlendirilebilir. Buna göre katalizörler,  $H_2O_2$ 'yi ayrıştırmak için aktivasyon enerjisini azaltır. Çimento bulamacında,  $H_2O_2$  molekülü oldukça karmaşık bir ortam ile karşı karşıyadır. Serbest bırakılan havanın (gaz) su içeriği, sıcaklığı ve dinamik parametreleri çok kararsızdır. Bu nedenle, çimento bulamacındaki gözenek boyutu ve miktarı da çok kararsızdır. Ayrıca, gözenek özellikleri gözenekli beton malzemelerinin termal iletkenliğini etkileyebilir.  $H_2O_2$  'nin çimento bulamacındaki köpürmeye (gaz üretimine) olan etkisi, katalizörlerin türleri ve dozajları tarafından belirlenmektedir (Xu *et al.* 2012).

Bu çalışmada ticari bir firmadan satılan alınan %50 konsantrasyon'a sahip  $H_2O_2$  kullanılmıştır.



**Resim 3.4** Çalışmada kullanılan hidrojen peroksit, süper akışkanlaştırıcı ve ploppropilen lif görüntüsü.

### 3.1.6 Kimyasal Katkılar

Süper akışkanlaştırıcılar, belirli bir beton bileşiminde kıvamı değiştirmeden su miktarının yüksek oranda azalmasını sağlayan veya su miktarı değişmeden çökmeyi/yayılmayı yüksek oranda artıran veya her iki etkiyi birlikte yaratan kimyasal katkılardır (TS EN 934-2). Akışkanlaştırıcılar işlenebilirliği önemli ölçüde iyileştirmek ve köpük beton kıvamını korumak için kullanılır (Tikalsky *et al.* 2004). Su azaltıcı katkı uygulamada taze betonun akışkanlığını ve plastikliğini kolaylaştırarak performansını artırmak için kullanılmakta olup, ayrışmaya neden olmazlar (Agarwal *et al.* 2000). Bu çalışmada TS EN-934–2 standardına uygun olan BASF Master Glenium süper akışkanlaştırıcı katkı süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

**Çizelge 3.6** Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı özellikleri.

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi – sıvı
Özgül ağırlık (20°C’de)	1,082 – 1,142 kg/lt
pH değeri	6 - 7
Alkali içeriği (%)	≤ 3 (ağırlıkça)
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0,10 (ağırlıkça)

### 3.1.7 Su

Hazırlanan harç numunelerinde Afyonkarahisar şebeke içme suyu kullanılmıştır. Hidrojen peroksit reaksiyon hızı büyük ölçüde reaksiyon sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle oksijen salım hızı veya köpürme işlemi sıcaklığa çok duyarlıdır. Huang *et al.* (2015), yapmış oldukları çalışmada köpük betonlarının görünür yoğunluğunun, köpüklenme sıcaklığının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir ve böylece 45 °C en uygun köpüklenme sıcaklığı önermişlerdir. Bu tez çalışmasında su sıcaklığı 45 °C olarak seçilmiştir

### 3.1.8 Polipropilen Lif

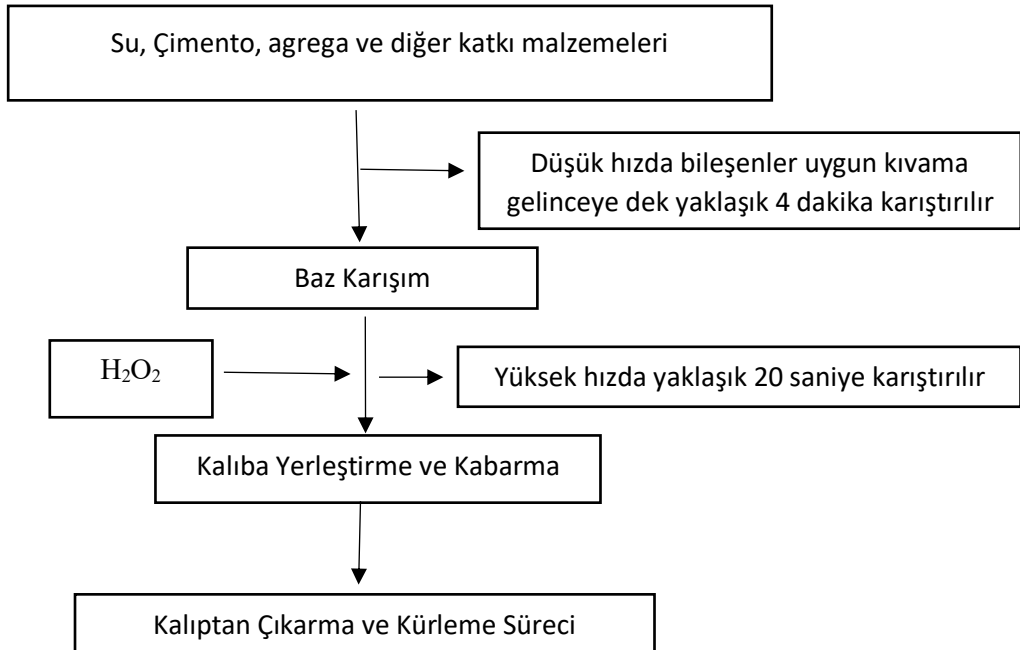
Bu karışımlarda köpük beton zamana ve hidratasyon sürecine bağlı olarak muhtemel rötrelere çatlaklarının gelişebileceği dikkate alınarak buna karşı önlem amacı ile polipropilen lif (PPL) ilave edilmiştir.

### 3.2 Metot

Çalışma örnekleri üretilirken mikserde önce su ve sırası ile süper akışkanlaştırıcı katkı, çimento, kum, kireç, kalsiyum stearat ilave edilerek karışım homojen hale gelinceye kadar (ortalama 4 dakika) karıştırılmıştır. Homojen hale gelen ve akıcı kıvamdaki harcın içerisine en son hidrojen peroksit ilave edilerek karışım yüksek hıza çıkarılmıştır. Bu hızda 20 sn kadar karıştırdıktan sonra beklemeden harç kalıplara dökülerek kabarma (genleşme) olayı gerçekleşmiştir (Resim 3.11). Laboratuvar ölçekli denemeler 22x15x35 cm plywood kalıplara dökülerek üretilmiş, kürünü tamamladıktan sonra Resim 3.5’ de görüldüğü gibi 10x10x10 cm ebatlandırılmıştır.



**Resim 3.5** 10x10x10 cm ebatlandırılmış köpük beton numuneleri.



**Şekil 3.3** Köpük beton üretim akım şeması.



**Resim 3.6** Karıştırma el mikseri (solda), karıştırma kabı (sağda).



**Resim 3.7** Genleşme sonrası çökme gerçekleşmiş numune.



**Resim 3.8** Genleşme gerçekleşmiş köpük beton numuneleri.

Bu çalışma kapsamında, özellikle binaların dış duvarlarında kullanılabilmeye uygun  $400 \text{ kg/m}^3$  kuru birim ağırlığa sahip köpük betonun hidrojen peroksit ile geliştirme yoluyla üretimi gerçekleştirilmiş ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. TS 13655'te köpük beton minimum basınç dayanımı  $1,5 \text{ MPa}$  olarak belirlenmiştir.  $1,5 \text{ MPa}$  ve üstü hedef dayanım olarak belirlenmiştir. Tez çalışması kapsamında; i)Ön deneme dökümleri yapılarak  $\text{H}_2\text{O}_2$  ile köpük beton geliştirme yöntemi izlenmiştir (Çizelge 3.5). ii)Ön deneme dökümlerinden uygun geliştirme karışım oranlarına ulaşılmış, köpük beton uçucu kül katkısız serisi dökümleri gerçekleştirilip yoğunluk-basınç mukavemeti değerleri incelemiştir. iii)Karışıma uçucu kül kütleye  $\%0,00-0,20-0,25-0,30-0,35-0,40$  oranlarında ilave edilmiştir. Yoğunluk-basınç mukavemeti oranları incelenmiştir (Çizelge 3.7). iv)Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için süper akışkanlaştırıcı (SA) katkı her bir seri için sırası ile katkısız (Kontrol serisi),  $800 \text{ g}$  ve  $1000 \text{ g}$  olarak ilave edilmiştir. Taze beton örneklerin akışkanlık değerleri Marsh Konisi yöntemi ile belirlenmiştir. Bu numuneler üzerinde akışkanlık değerleri ve yoğunluk-basınç mukavemeti oranları incelenmiştir (Çizelge 3.7). Karışım oranları Çizelge 3.7, 3.8, 3.9, 3.10'da verilmiştir. Karışımlarda bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Dolgu malzemesi ve köpük betonun iskeletini oluşturan ince kum kullanılmıştır. Kalsiyum setarat (CS) akıcı kıvamdaki harcın priz süreci devam ederken çökme engelleyici katkı amacı ile karışımda kullanılmıştır. Karışımda su miktarının azaltarak, akışkanlığı sağlamak amacı ile BASF Master Glenium süper akışkanlaştırıcı katkı (SA) kullanılmıştır. Her bir karışım serisinden ortalama 6 adet deney örneği üretilmiştir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra normal hava koşullarında 28 gün süre ile ve günde iki kez sulanarak bekletilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numuneler birim hacim ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla değişmez kütleye gelinceye kadar  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki etüv içerisinde bekletilmişlerdir. Kuruma işlemi tamamlanan numuneler  $0,1 \text{ g}$  hassasiyetli terazide tartılarak ağırlıkları belirlenmiştir. Birim hacim ağırlıkları belirlenen numuneler üzerinde önce ultrases geçiş hızı deneyi yapılmış daha sonra ise,  $20 \text{ ton}$  kapasiteli pres ile basınç mukavemetleri hesaplanmıştır.

### 3.2.1 Ön Deneme Döküm Serilerin Karışım Oranları

Kabarma yönteminin uygunluğu ve harç bileşenlerini oluşturan malzemelerin uyumu hakkında ön bilgiler elde etmek amacı ile ön deneme çalışması yürütülmüştür. Ön deneme serisi (ÖDS) köpük beton örnekleri için seçilen karışım oranları Çizelge 3.7’te sunulmuştur.

**Çizelge 3.7** Köpük beton ön deneme karışım oranları.

Karışım No	Çimento (kg)	İnce Kum (kg)	Su (lt)	CS (kg)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	SA (lt)
ÖDS1	225	75	150	1	2	0,6
ÖDS2	225	75	155	1	2	0,6
ÖDS3	225	85	160	1	2	0,6
ÖDS4	225	85	165	1	2	0,6
ÖDS5	225	90	160	1	2	0,6

CS: Kalsiyum Stearat, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Hidrojen Peroksit, SA:Süper alıştırıcı katkı.  
Not: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çimento kütlesinin %’si olarak karışıma ilave edilmiştir.

### 3.2.2 Uçucu Kül Katkısız Serilerin Karışım Oranları

Uçucu kül katkısız köpük beton serisi (KB) örnekleri için seçilen karışım oranları Çizelge 3.8’da sunulmuştur. Buna göre karışımlar kütlece çizelgede verilen oranlarda tartılarak hazırlanmıştır.

**Çizelge 3.8** Köpük beton uçucu kül katkısız serisi karışım oranları.

Karışım No	Çimento (kg)	İnce Kum (kg)	Su (lt)	CS (kg)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	SA (lt)
KB1	225	90	165	1	2	0,6
KB2	225	100	165	1	2	0,6
KB3	225	100	170	1	2	0,6
KB4	225	110	170	1	2	0,6
KB5	225	110	175	1	2	0,6

CS: Kalsiyum Stearat, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Hidrojen Peroksit, SA:Süper alıştırıcı katkı.  
Not: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çimento kütlesinin %’si olarak karışıma ilave edilmiştir.

### 3.2.3 Uçucu Kül Katkılı Serilerin Karışım Oranları

Uçucu kül katkısız serisi örneklerinden sonra uçucu külün pozolanik özelliğinden faydalanmak ve köpük beton bünyedeki fiziksel ve mekanik etkilerini belirlemek için uçucu kül katılı köpük beton örnekleri üretilmiştir. Buna göre uçucu kül çimento ağırlığının %0,00, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35, 0,40 oranında karışımlara ilave edilmiştir. Bu karışımlarda köpük betonun zamana ve hidrasyon sürecine bağlı olarak muhtemel rötre çatlaklarının gelişebileceği dikkate alınarak buna karşı önlem amacı ile polipropilen lif (PPL) ve gözenek yapısını düzenlemek (gözenek büyümesini engellemek amacı ile Mono Polipropilen Glikol (MPG) karışımlara ilave edilmiştir (Çizelge 3.9).

**Çizelge 3.9** Köpük beton uçucu kül ilaveli üretimi karışım oranları.

Karışım No	Çimento (kg)	İnce Kum (kg)	Uçucu Kül (%)	Su (lt)	Kireç CaO (%)	CS (kg)	PPL (g)	MPG (g)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	SA (lt)
UK20	225	65	20	155	2	1	-	-	2	0,7
UK20	225	65	20	160	2	1	-	450	2	0,7
UK25	225	85	25	162	2	1	225	-	2	0,7
UK25	225	85	25	165	2	1	225	450	2	0,7
UK30	225	90	30	165	2	1	225	450	2	0,7
UK30	225	90	30	167	2	1	225	450	2	0,7
UK35	225	95	35	167	2	1	225	450	2	0,7
UK35	225	95	35	170	2	1	225	450	2	0,7
UK40	225	100	40	170	2	1	225	450	2	0,7
UK40	225	100	40	172	2	1	225	450	2	0,7

CS: Kalsiyum Stearat, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Hidrojen Peroksit, SA: Süper alıştırıcı katkı. PPL: Polipropilen Lif, MPG: Mono Polipropilen Glikol

**Not:** PPL çimento kütlesinin %0,1 oranında, MPG: çimento kütlesinin %0,2 oranında, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: çimento kütlesinin %'si, Uçucu kül çimento kütlesinin %'si olarak karışıma ilave edilmiştir.

### 3.2.4 Karışım Suyuna Olan Etkisini Gözlemlemek İçin Süper Akışkanlaştırıcı Katkılı Karışımların Hazırlanması

Karışımında su miktarının azaltarak, akışkanlığı sağlamak amacı ile BASF Master Glenium süper akışkanlaştırıcı katkı (SA) her bir seri için sırası ile katkısız (Kontrol serisi), 800 g ve 1000 g olarak ilave edilmiştir (Çizelge 3.10). Taze beton örneklerin akışkanlık değerleri Marsh Konisi yöntemi ile belirlenmiştir. Örneklerin üretiminde aynı yöntem izlenmiştir. Örneklerin kuru birim ağırlıkları belirlenmiş ve daha sonra 20 tonluk basınç presinde kırılarak basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı değerleri, akışkanlık değerleri ve yoğunluk–basınç mukavemeti oranları incelenmiştir.

**Çizelge 3.10** Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için SA katkılı karışım reçetesi.

Karışım No	Çimento (Kg)	İnce Kum (kg)	Uçucu Kül (%)	Su (Lt)	Kireç Ca(OH) (%)	CS (kg)	PPL (Gr)	MPG (Gr)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	SA (Kg)
1-1*	230	70	25	150	2	1	230	460	2	-
1-2	230	70	25	150	2	1	230	460	2	0,8
1-3	230	70	25	150	2	1	230	460	2	1,0
2-1*	230	85	25	155	2	1	230	460	2	-
2-2	230	85	25	155	2	1	230	460	2	0,8
2-3	230	85	25	155	2	1	230	460	2	1,0
3-1*	230	90	30	160	2	1	230	460	2	-
3-2	230	90	30	160	2	1	230	460	2	0,8
3-3	230	90	30	160	2	1	230	460	2	1,0
4-1*	230	95	35	162	2	1	230	460	2	-
4-2	230	95	35	162	2	1	230	460	2	0,8
4-3	230	95	35	162	2	1	230	460	2	1,0
5-1*	230	100	40	172	2	1	230	460	2	-
5-2	230	100	40	172	2	1	230	460	2	0,8
5-3	230	100	40	172	2	1	230	460	2	1,0

(\*)Kontrol numuneleri, CS: Kalsiyum Stearat, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: Hidrojen Peroksit, SA: Süper akışkanlaştırıcı katkı, PPL: Polipropilen Lif, MPG: Mono Polipropilen Glikol. **Not:** PPL çimento kütleinin %0,1 oranında, MPG: çimento kütleinin %0,2 oranında, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: çimento tozu kütleinin %2'si olarak karışıma ilave edilmiştir.

### 3.3 Örnekler Üzerinde Yürütülen Test ve Analizler

Bu bölümde harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneyler açıklanmıştır.

#### 3.3.1 Basınç Mukavemeti Deneyleri

Deney numunelerinin basınç dayanımları TS EN 772-1 standartında formül (3.6)' ya göre belirlenmiştir. Basınç dayanımı için 20 ton basınç kapasiteli beton basınç presini kullanılmıştır (Resim 3.9). Basınç dayanımı deneyinde (100 x 100 x 100) mm ebatlandırılmış köpük beton numuneleri kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi yapılmadan önce deney numuneleri değişmez kütleye gelinceye kadar 105 °C sıcaklığa ayarlanan etüvde 24 saat süre ile kurutulmuş ve ortam sıcaklığına kadar soğuması için bir süre bekletilmiştir. Numuneler kabarma yönüne dik olarak olarık prese yerleştirilmiştir. Gerilme artışı 0,5 N/mm<sup>2</sup>/sn olacak şekilde sabit bir hızda, sürekli ve darbesiz olarak numune kırılıncaya kadar yüklenmiştir. Elde edilen basınç dayanımları kaydedilmiştir.

$$f_b = P_k / A_0 \quad (3.6)$$

$f_b$  = Basınç dayanımı (MPa)  $A_0$  = Yüzey alanı (mm<sup>2</sup>)  $P_k$  = Kırılma anındaki yük (N)



**Resim 3.9** Numunelere uygulanan basınç mukavemeti deneyi.

### 3.3.2 Birim Ağırlık Deneyi

Örnekler kalıptan çıkarıldıktan sonra boyutlandırılarak kür için 28 gün süre ile bekletilmiştir. Bu sürede gölgede ve günde iki kez sulanmak süreti ile kür işlemi uygulanmıştır. Çalışmada üretilen numuneler 10x10x10 cm ebatlandırılmış ve numunelerin hacimleri hesaplanabilmesi için deney numuneleri değişmez kütleyle gelinceye kadar 105 °C sıcaklığa ayarlanan etüvde 24 saat süre ile kurutulmuş ve ortam sıcaklığına kadar soğuması için bir süre bekletilmiştir. Daha sonra terazi kullanılarak 10x10x10 cm ebatlarındaki numunelerin ağırlıkları alınıp, küp numune hacmine bölünerek TS EN 772-13 standartına göre kuru birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Kuru birim ağırlık formül (3.7) yardımıyla ile hesaplanmıştır.

$$D_h = \left( \frac{M_k}{V_h} \right) \times 1000 \quad (3.7)$$

D<sub>h</sub>: Birim Hacim Ağırlığı (kg/m<sup>3</sup>) M<sub>k</sub>: Etüv Kuru Ağırlık (kg) V<sub>h</sub>: Numunenin hacmi (Boşluklar Dahil, m<sup>3</sup>)

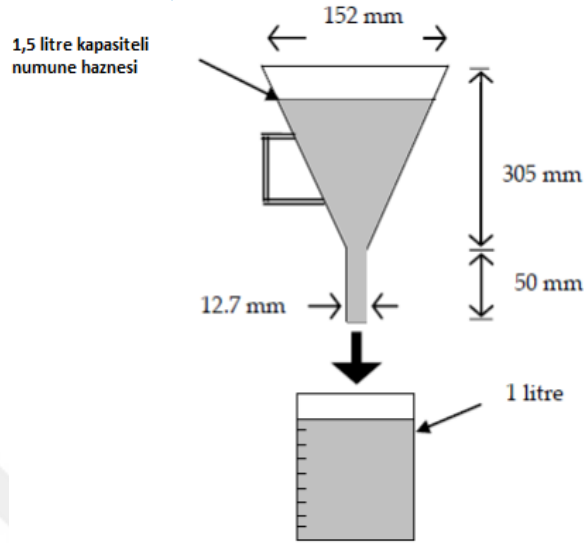


**Resim 3.10** Etüv kuru numunelerin tartımı.

### 3.3.3 Marsh Konisi – Akışkanlık Deneyi

Bu metot genellikle 1,5 litre hazır harcın bu huniden 1 litre harcın akış süresinin ölçülmesine dayanmaktadır. Akma süresi yanında akış davranışı da izlenerek kaydedilir. Bir litre harcın bir dakikadan daha az sürede akması halinde sabit ve dengeli akma şeklinde değerlendirme yapılır

(Jones *et al.* 2003). Buna karşı akma süresi 1 dakikayı geçiyorsa engelli ya da zor akan harç şeklinde kayıt edilir. Eğer hiç akma yoksa “akmadı” şeklinde yazılır (Mohammad 2011).



Şekil 3.4 Kullanılan akış (Marsh) konisi ebatları.

Çizelge 3.11 Köpük beton harcının akma süresine göre yapılan sınıflandırılma (Jones *et al.* 2003).

Temel sınıf	Tanımı	Alt sınıfı	Açıklama
1	1 litre < 1 dk	A	Sabit-düzenli akma
2	1d<akma <2 dk	B	Kesikli olarak akma
3	0.5 litre< akış<1 litre	C	Hafifçe sıkıştırılarak akışın tamamlanması
4	Akma<0,5 Litre	-	Sadece 1. ve 2. akış sınıfları
5	Akma yoktur	-	uygundur.



**Resim 3.11** Akış (Marsh) konisi.

### 3.3.4 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyinde, deney örneğine giren ses dalgalarının bir yüzeyinden diğer bir yüzeyine geçiş süresi ölçülerek, dalga hızı hesaplanmaktadır. Ultrases cihazı, ses üstü dalgaların, problar arasında kalan mesafeden ne kadar zamanda geçtiğini mikrosaniye biriminde belirtir ve cihazda bulunan ekrana aktarır. Hesaplaması yapılan ses dalgasının hızı ile beton malzemenin basınç dayanım değeri ve başka özellikleri arasında ilişki kurulabilmektedir. (Erdoğan 2015).

Ses üstü dalganın geçiş süresi makine üzerinde okunduktan sonra formül (3.8) yardımıyla dalga hızı hesap edilmektedir.

$$V = L/t \quad (3.8)$$

V: Ses üstü dalga hızı (km/s), L: Problar arası mesafe (km), t: Zaman (s)



**Resim 3.12** Numunelere uygulanan ultrases deneyi.

### 3.3.5 Mikroyapı İncelemeleri

Çalışmada üretilen ve normal hava koşullarında günde 2 kez sulanarak kürlenmiş köpük beton numunelerinden alınan parçalar, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezine gönderilerek Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır. Numunelerin SEM analizleri için LEO marka 1430 VP model SEM cihazı W (Tungsten) kullanılmıştır.



**Resim 3.13** SEM cihazı.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

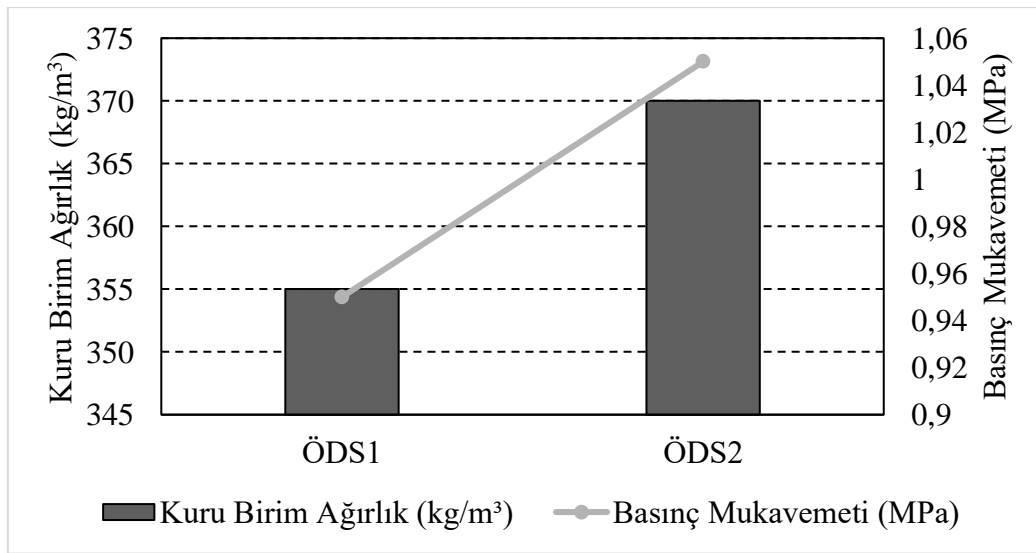
Çalışma kapsamında hazırlanan reçetelerle üretilen köpük beton numunelerin birim hacim ağırlık, basınç mukavemeti, marsh konisi (akışkanlık), ultrases geçiş hızı deney sonuçları ve mikro yapı incelemeleri bu bölümde verilmiştir.

##### 4.1 Ön Deneme Dökümlerinde Köpük Betonun H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> İle Genleşme Düzeyinin Kontrolü

Bu bölümde ön deneme dökümlerinde üretilen numunelerin sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 4.1** Ön deneme karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi.

Karışım No	Kuru Birim Ağırlık (Kg/m <sup>3</sup> )	Basınç mukavemeti * (MPa)	AÇIKLAMA
ÖDS1	350	-	Çökme gelişti
ÖDS2	345	-	Çökme gelişti
ÖDS3	350	-	Kısmen çökme
ÖDS4	355	0,95	-
ÖDS5	370	1,05	-



**Şekil 4.1** Ön deneme karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

İlk üç karışım serisinde kabarma sonrasında çökme gelişmiştir (Çizelge 4.1). Bunun başlıca nedeninin düşük birim ağırlıkta dökümden kaynaklandığı, priz sürecinde yeterli mukavemeti kazanmayan gözenekli hafif beton bünyesinin kendi ağırlığını taşıyamayarak çökmesi ile sonuçlandığı düşünülmektedir. Kuru birim ağırlığı  $350 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha büyük olan karışım serilerinde herhangi bir çökme olayı gözlenmemiştir. Birim ağırlığı artan köpük karışımlarda çökme olayı gözlenmemiştir. Birim ağırlığı  $355$  ve  $370 \text{ kg/m}^3$  olan serilerde  $0,95$  ile  $1,05 \text{ MPa}$  değerlerinde basınç mukavemet değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.1). Burada yoğunluk ve basınç dayanımının doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.



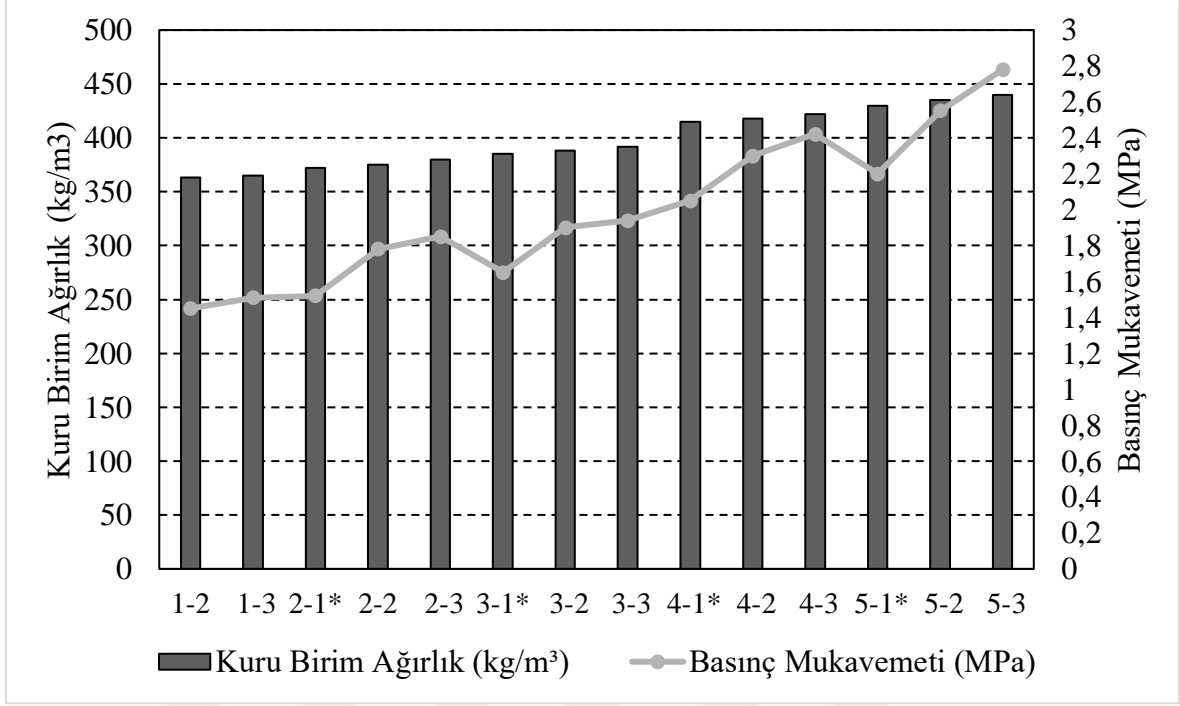
## 4.2 Süper Akışkanlaştırıcı Etkisi ve Marsh Konisi Deneyleri Döküm Serisi Sonuçları

Bölüm 3.2.4’de verilen karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

**Çizelge 4.2** SA katkısız-katkılı karışım numunelerinin kuru birim ağırlık - basınç dayanımı ilişkisi değerleri.

Karışım No	Kuru Birim Ağırlık (K.B.A) (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa)	AÇIKLAMA
SA1-1*	360	-	Kısmen Çökme
SA1-2	363	1,45	-
SA1-3	365	1,51	-
SA2-1*	372	1,52	-
SA2-2	375	1,78	-
SA2-3	380	1,85	-
SA3-1*	385	1,65	-
SA3-2	388	1,90	-
SA3-3	392	1,94	-
SA4-1*	415	2,05	-
SA4-2	418	2,30	-
SA4-3	422	2,42	-
SA5-1*	430	2,20	-
SA5-2	435	2,55	-
SA5-3	440	2,78	-

(\*) Kontrol numuneleri

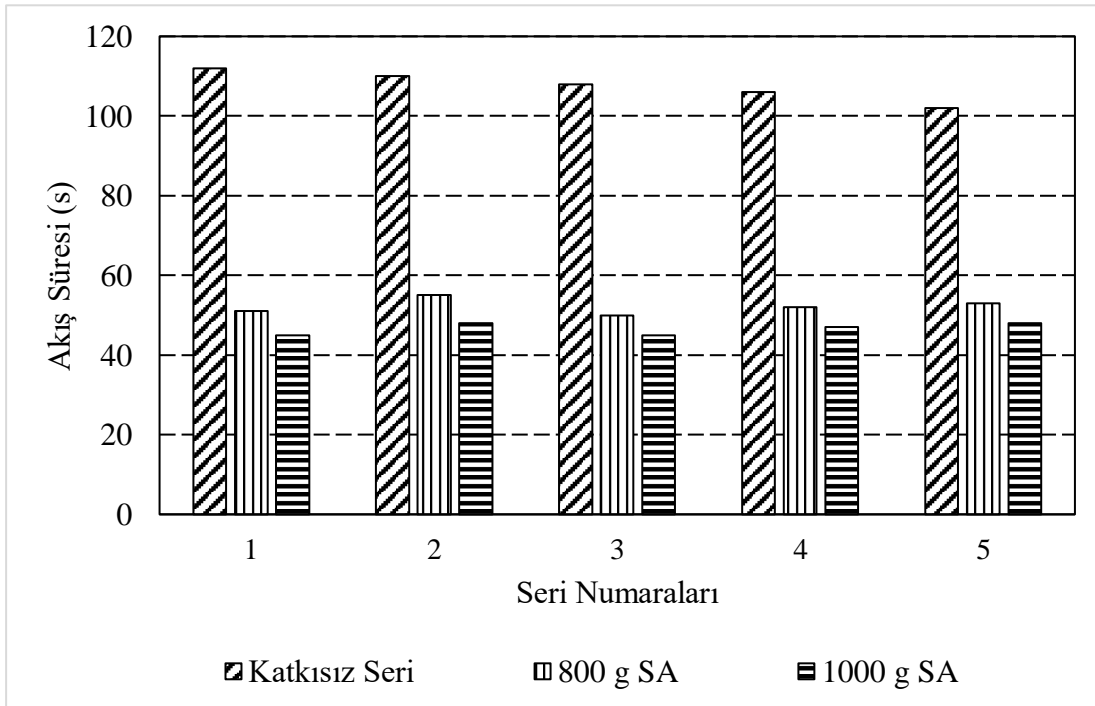


Şekil 4.2 Basınç mukavemeti – kuru birim ağırlık ilişkisi grafiği.

Örneklerin birim ağırlık değerleri  $360 - 440 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir. Karışıma giren kuru madde miktarı arttıkça birim ağırlık değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Mukavemet değerlerini etkileyen iki ana faktör belirlenmiştir. Buna göre örneklerin birim ağırlıkları arttıkça mukavemet değerleri doğrusal artış göstermiştir. 1,5 MPa değeri 1 ve 2 No'lu seriler dışındaki karışım reçetelerinin tamamı aşmıştır. Birim ağırlıklarına bağlı olarak 1,45 ile 2,78 MPa basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Karışıma giren akışkanlaştırıcı daha homojen bir yayılma sağlamış ve karışımların aynı katı madde miktarında 800 g ve 1000 g akışkanlaştırıcı ilavesinin numunelerin basınç dayanımının artmasını sağlamıştır (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.3** Süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı ve marsh konisi akış süresi ilişkisi.

Karışım No	SA (Kg)	Akış Süresi (sn)
SA1-1*	-	112
SA1-2	0,8	51
SA1-3	1,0	45
SA2-1*	-	110
SA2-2	0,8	55
SA2-3	1,0	48
SA3-1*	-	108
SA3-2	0,8	50
SA3-3	1,0	45
SA4-1*	-	106
SA4-2	0,8	52
SA4-3	1,0	47
SA5-1*	-	102
SA5-2	0,8	53
SA5-3	1,0	48



**Şekil 4.3** Süper akışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız örnekler marsh konisi akış süresi ilişkisi grafiği.

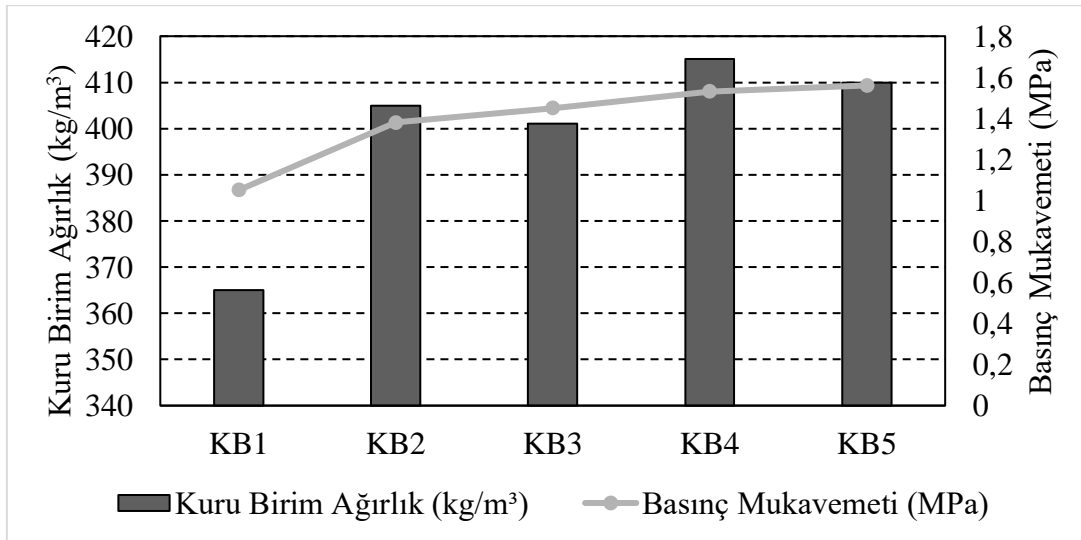
Örneklerin akış değerleri incelendiğinde SA katkısı olan örneklerde “düzenli akış” (1 dakikanın altında) gerçekleşmiştir. Buna karşı SA katılmayan (kontrol serisi) karışımlarda akış süreleri 1 dakika ile 2 dakika arasında kalarak “kesikli akış” göstermiştir. Diğer bir anlatımla akma zorlaşmıştır. Bu etki köpük betonun gözenek dağılımını ve mukavemet özelliklerini de olumsuz etkilenmesi ihtimalini artırmaktadır. Akış süreleri azaldıkça (akışkanlık arttıkça) kalıba daha düzenli yerleşme ve homojen bir karışım sağlanmıştır.

#### 4.3 Uçucu Kül Katkısız Serilerin Sonuçları

Bölüm 3.2.2’ de verilen karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri bu bölümde sunulmuştur.

**Çizelge 4.4** Uçucu kül katkısız serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi.

Karışım Seri No	Kuru Birim Ağırlık (Kg/m <sup>3</sup> )	Basınç mukavemeti (MPa)
KB1	365	1,05
KB2	405	1,45
KB3	401	1,38
KB4	418	1,56
KB5	410	1,53



**Şekil 4.4** Uçucu kül katkısız karışım serileri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Burada birim ağırlığı 350 kg/m<sup>3</sup>'ten büyük örnekler üretilmiş ve çökme gözlenmemiştir. Birim ağırlığı 365,401,405 kg/m<sup>3</sup>'ün olan karışım serilerinde 1,05 MPa ile 1,45 MPa arasında basınç

mukavemet değerleri elde edilmiştir. Bu değerler TS 13655' te verilen köpük beton minimum 1,5 N/mm<sup>2</sup> basınç mukavemeti değerlerini sağlamamaktadır. Birim ağırlığı 410 ve 415 kg/m<sup>3</sup> olan serilerde 1,5 MPa ve üstü değerler elde edilmiştir. Yoğunluk artışıyla, basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir.

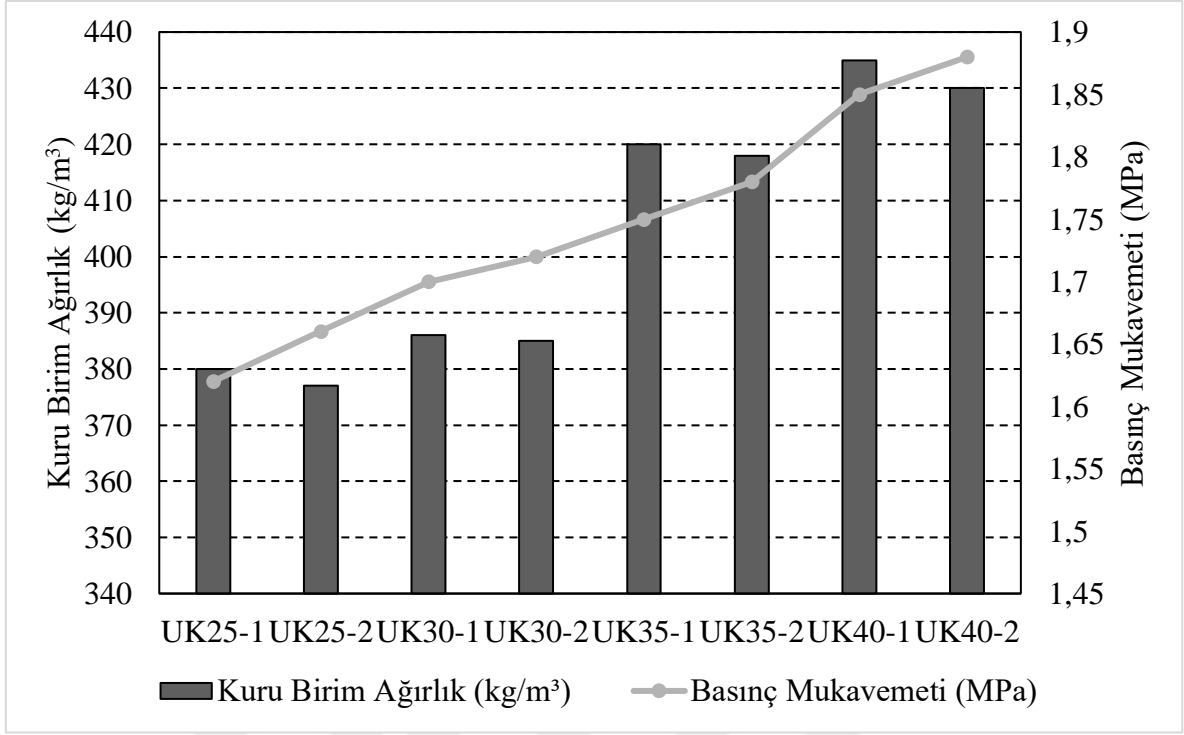
#### 4.4 Uçucu Kül Katkılı Mekanik zellikleri

Bölüm 3.2.3' te verilen karışımların fiziksel ve mekanik özellikleri bu bölümde sunulmuştur. Uçucu kül katkı serilerin yoğunluk-basınç mukavemeti değerleri izelge 4.5' te verilmiştir. Uçucu kül katkısız numunelerinin yoğunluk-basınç mukavemeti değerleri izelge 4.4' te verilmiş, bu değerler kullanılarak hazırlanan grafik Şekil 4.6' da sunulmuştur.

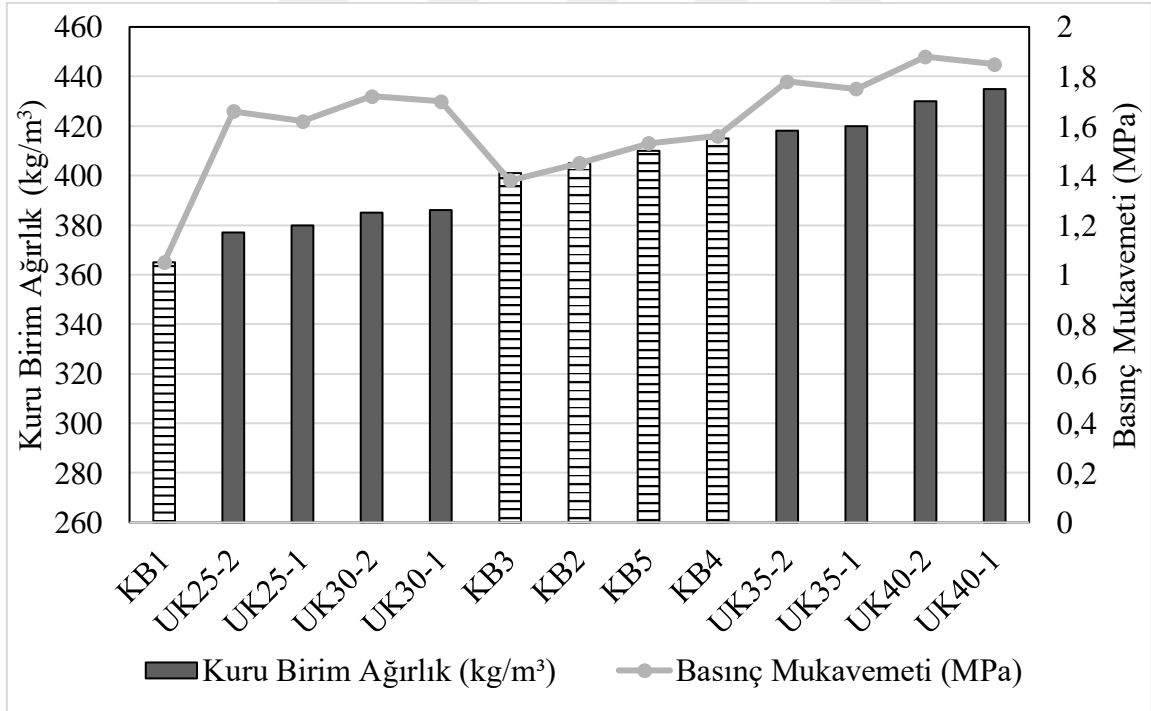
**Çizelge 4.5** Uçucu kül ilaveli numunelerin kuru birim ağırlık-basınç mukavemeti ilişkisi değerleri.

Karışım No	Kuru Birim Ağırlık (Kg/m <sup>3</sup> )	Basınç mukavemeti değerleri (N/mm <sup>2</sup> )	Açıklama
UKB20-1	370	-	Kısmen kme
UKB20-2	365	-	Kısmen kme
UKB25-1	380	1,62	-
UKB25-2	377	1,66	-
UKB30-1	386	1,70	-
UKB30-2	385	1,72	-
UKB35-1	420	1,75	-
UKB35-2	418	1,78	-
UKB40-1	435	1,85	-
UKB40-2	430	1,88	-

Not:UKB20-1 kısaltması, UKB: Uçucu kül katkılı beton, 20: Uçucu külün, imento kütlesinin karışıma katılan % miktarı, -1 karışım numarası.



Şekil 4.5 Uçucu kül ilaveli örneklerin yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.



Şekil 4.6 Uçucu kül katkısız ve uçucu kül ilaveli numuneleri yoğunluk-basınç dayanımı ilişkisi.

- Uçucu kül ilave edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri.
- ▨ Uçucu kül katkısız numunelerin yoğunluk değerleri.

Kuru birim ağırlık değerleri 365 ile 435 kg/m<sup>3</sup> arasında gerçekleşmiştir. Örneklerin basınç mukavemeti değerleri birim ağırlıklarına bağlı olarak 1,62-1,88 MPa arasında değişmektedir. Bu değerler TS 13655' te verilen köpük beton minimum 1,5 MPa basınç mukavemeti değerlerini sağlamaktadır. Dökümü yapılan köpük beton örneklerde herhangi bir rötre çatlak gözlemlenmemiştir. Uçucu kül katkısız dökümleri ile aynı tutulan çimento oranı ile %20-40 oranlarında uçucu kül katkılı aynı ve/ya yaklaşık yoğunluğa sahip numunelerde artan mukavemet değerleri elde edilmiştir. Diğer bir anlatımla uçucu kül katkını köpük beton numunelerin basınç mukavemeti değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Bunun uçucu külün puzalonik özelliğinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

Gözenek düzenleyici MPG katkısının gözeneklerin büyüklükleri ve dağılımı üzerine olan etkileri gözlemsel yolla incelenmiş ve gözenek dağılımının iyileştiği görülmüştür.

**Çizelge 4.6** Çalışmalarda üretilen köpük beton numuneleri üzerinde uygulanan deney sonuçları.

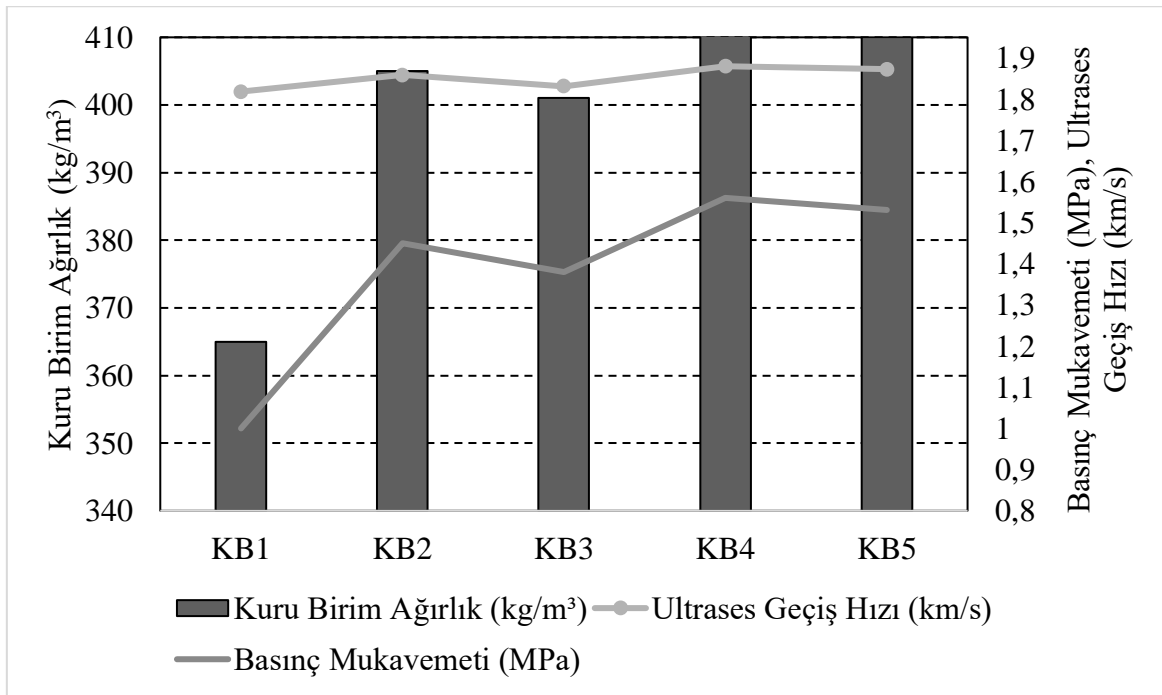
Karışım No	Akma Süresi (s)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa)
ÖDS1	-	350	-
ÖDS2	-	345	-
ÖDS3	-	350	-
ÖDS4	-	355	0,95
ÖDS5	-	370	1,05
KB1	-	365	1,05
KB2	-	405	1,45
KB3	-	401	1,38
KB4	-	418	1,56
KB5	-	410	1,53
UK20-1	-	370	-
UK20-2	-	365	-
UK25-1	-	380	1,62
UK25-2	-	377	1,66
UK30-1	-	386	1,7
UK30-2	-	385	1,72
UK35-1	-	420	1,75
UK35-2	-	418	1,78
UK40-1	-	435	1,85
UK40-2	-	430	1,88
SA1-1*	112	360	-
SA1-2	51	363	1,45
SA1-3	45	365	1,51
SA2-1*	110	372	1,52
SA2-2	55	375	1,78
SA2-3	48	380	1,85
SA3-1*	108	385	1,65
SA3-2	50	388	1,9
SA3-3	45	392	1,94
SA4-1*	106	415	2,05
SA4-2	52	418	2,3
SA4-3	47	422	2,42
SA5-1*	102	430	2,2
SA5-2	53	435	2,55
SA5-3	48	440	2,78

Not: ÖDS: Ön deneme serileri, KB: Uçucu kül katkısız serileri, UK20-1: %'dece uçucu kül katkılı serileri, SA1-1\*: Süper akışkanlaştırıcı etkisi ve marsh konisi deney serileri.

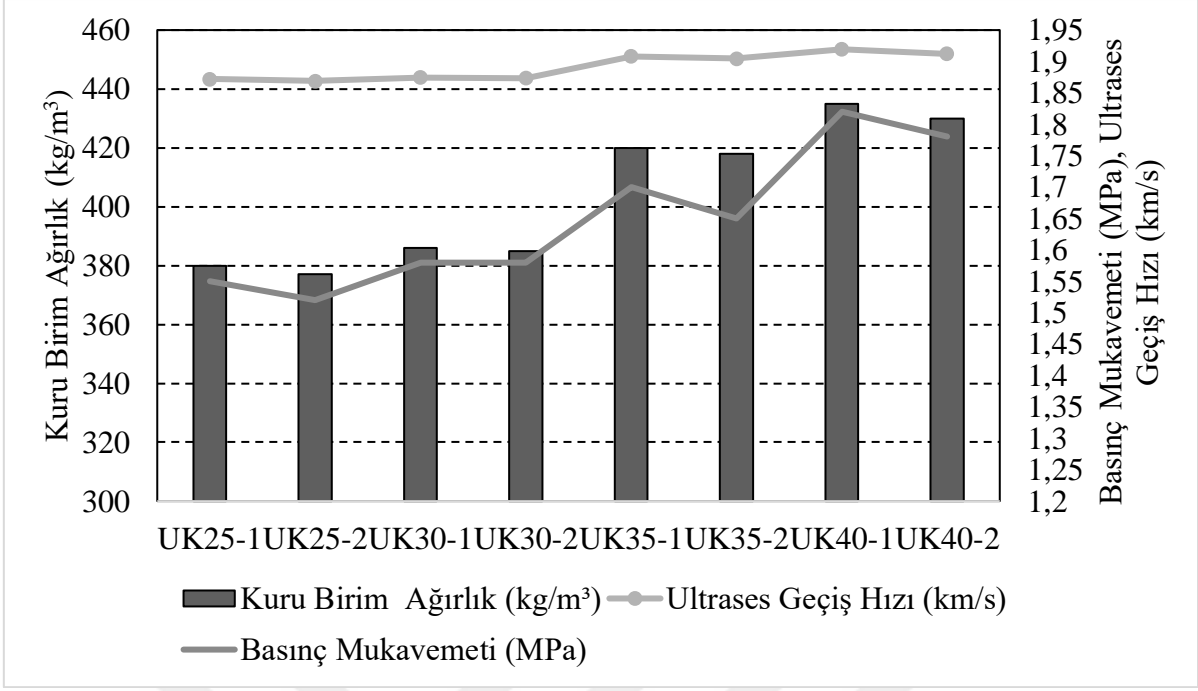
Çalışmada üretilen köpük beton numunelerinde SA5-3 karışım nolu reçete ile üretilen örneklerde 440 kg/m<sup>3</sup> kuru birim ağırlığa sahip numunelerde 2,78 maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir.

#### 4.5 Ultrases Geçiş Test Sonuçları

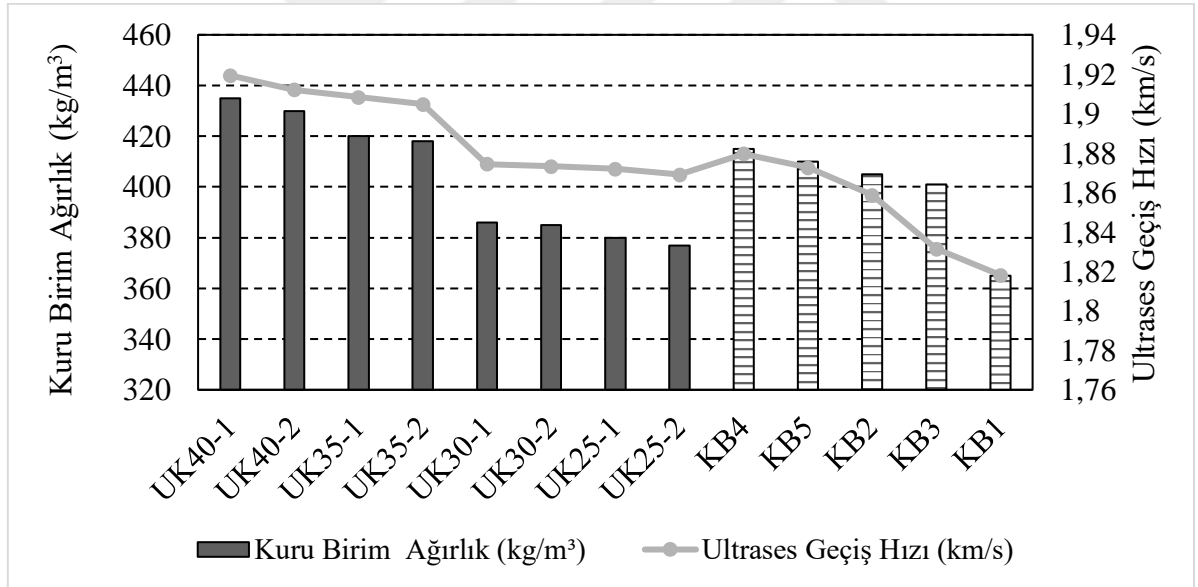
Betonda boşluk yapısının azalmasıyla beraber sesin geçiş hızını arttırmaktadır. Bu durumun nedeni ise sesin boşluk içerisinde, katı madde bileşimine göre daha yavaş hareket etmesidir. Birim hacim ağırlığı artmasıyla üretilen numuneler daha yoğun yapıda olmaktadır ve ultrases geçiş hızı artması beklenmektedir. Çalışmada üretilen numunelerde uygulanan ultrases geçiş hızı deney sonuçları bu durumu doğrulamaktadır.



Şekil 4.7 Uçucu kül katkısız seri kuru birim ağırlık – basınç mukavemeti -ultrases geçiş hızı deney sonuçları.



Şekil 4.8 Uçucu kül katkıli seri kuru birim ağırlık – basınç mukavemeti - ultrases geçiş hızı deney sonuçları.

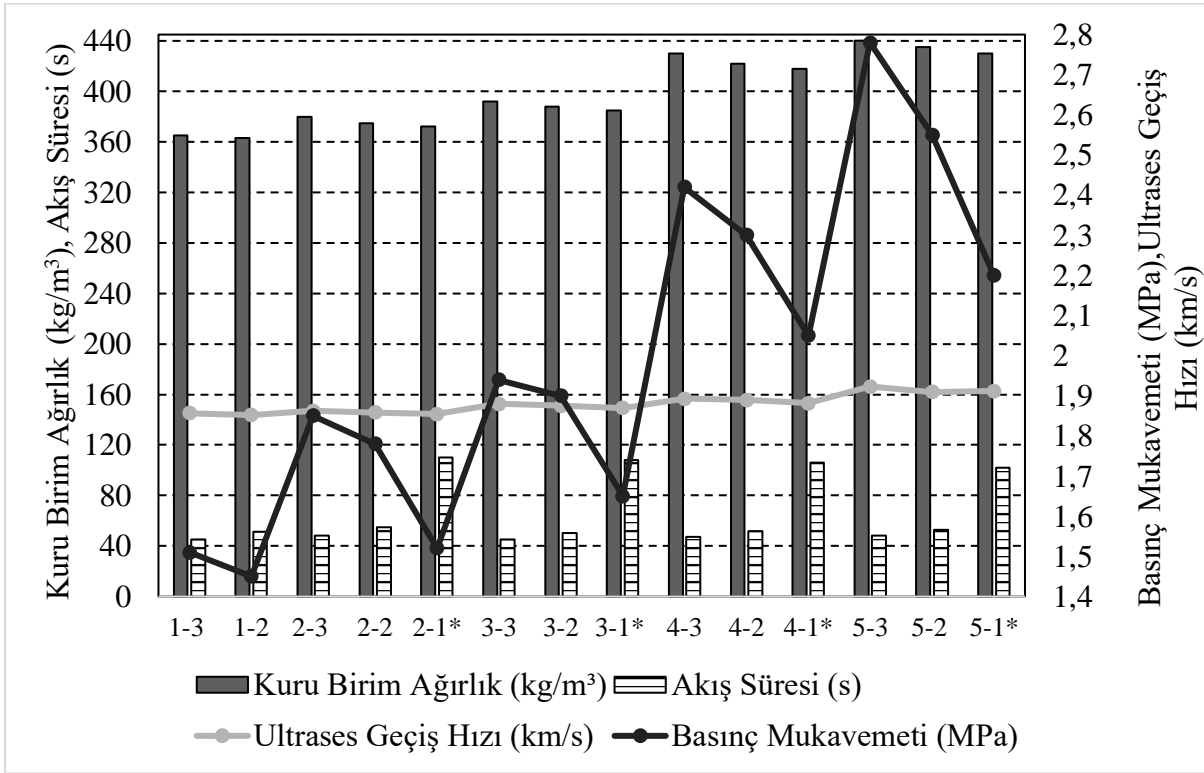


Şekil 4.9 Uçucu kül katkıli ve uçucu kül katkısiz numunelerin yoğunluk - ultrases geçiş hızı deney sonuçları.

- Uçucu kül ilave edilmiş numunelerin yoğunluk değerleri.
- ▨ Uçucu kül katkısiz numunelerin yoğunluk değerleri.

Uçucu kül katkısiz, uçucu kül katkıli ve bu iki farklı karışım serilerinin yoğunluk – ultrases geçiş hızları değerleri Şekil 4.7, 4.8, 4.9’da verilmiştir. Burada beklenildiği gibi yoğunluk artışı ile birlikte basınç mukavemeti ve ultrases geçiş hızı değerleri yükselmiştir. Ayrıca uçucu kül katkıli serilerde uçucu kül katkısiz serilere göre aynı ve/veya yaklaşık kuru birim ağırlıklarda

ultrases geçiş hızının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durumun uçucu külün ince tane boyutu ile daha boşluksuz bir yapı sağlayarak ultrases geçiş hızını arttığı dştnlmektedir.



Şekil 4.10 SA katkılı örneklerin kuru birim ağırlık - basınc mukavemeti - akış süresi - ultrases geçiş hızı ilişkisi.

Karışım suyuna olan etkisini gözlemlemek için SA katkılı serilerde aynı katı madde miktarlarında 800 g ve 1000 g olarak karışıma ilave edilen SA katkıları karışımların akışkanlığını arttırmış kalıba daha düzenli yerleşme ve homojen bir karışım sağlanmıştır. Buna bağlı olarak karışımların homojen yapı kazanması ve daha yoğun yapı oluşması sebebiyle kuru birim ağırlıkları artış göstermiştir. Birim ağırlıklarındaki artışla beraber basınc mukavemeti, ultrases geçiş hızıda artmıştır. Şekil 4.10'da grldğu gibi karışımlara giren katı madde miktarı arttıka birim ağırlıkla doğrusal oranda ultrases geçiş hızıda artmıştır.

#### 4.6 İç Yapı İnceleme Sonuçları

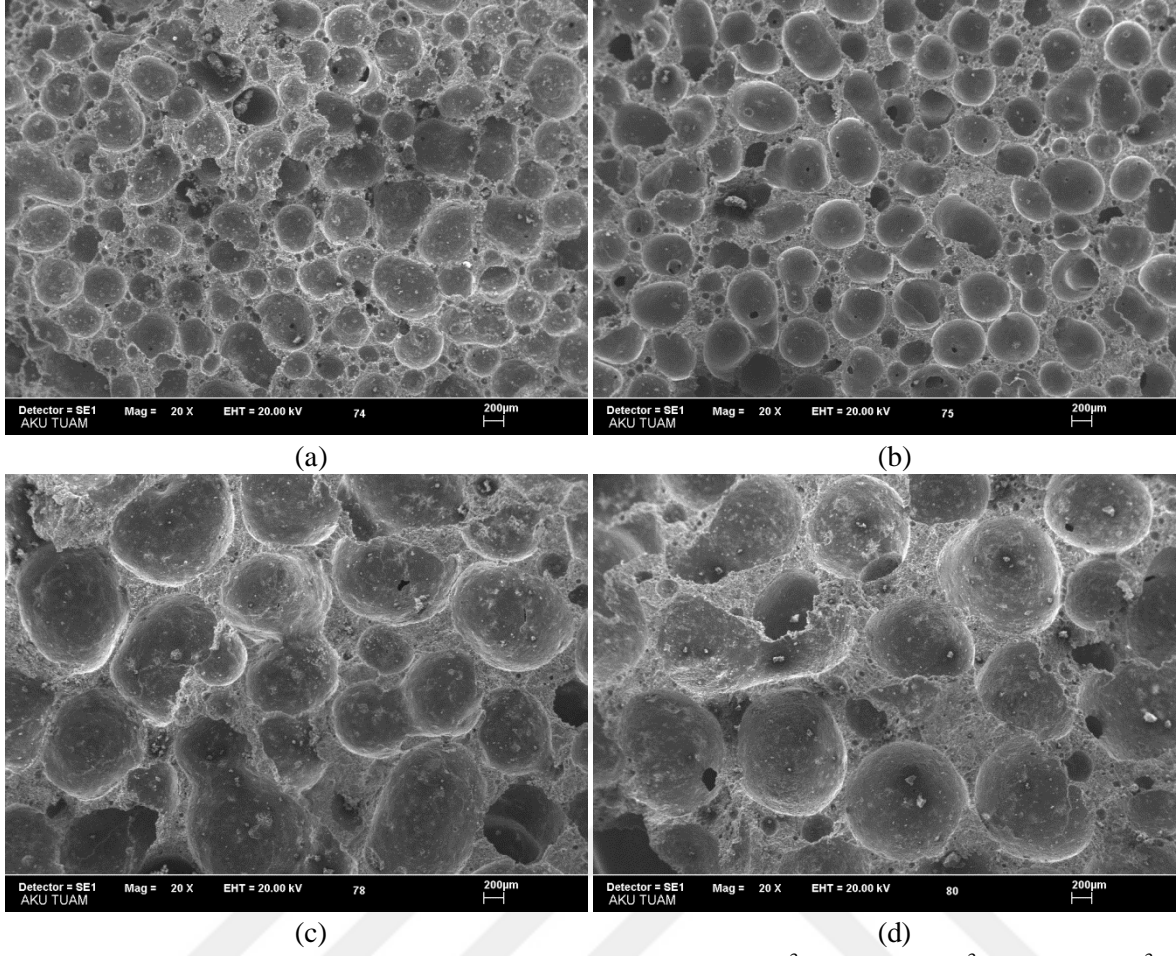
Köpük beton örneklerin içyapı incelemeleri için seçilen numuneler üzerinde Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) tekniği kullanılarak incelemeler yapılmıştır. Ayrıca numunelerdeki hücre büyüklük ve dağılımlarını belirlemek için küçük büyütmelemlerle makro yapı incelemeleri yapılmıştır. Numuneler arasında hammadde bileşimleri, birim hacim ağırlığı, basma dayanımı, seçilen 4 numune üzerinde iç yapı incelemeleri yapılmıştır.

Resim 4.1’de üretilen köpük beton numunelerinin eşit büyütmelemlerde (20X) yapılan inceleme sonrası elde edilen hücre yapısı fotoğrafları gösterilmiştir. Numunelerin birim ağırlık değişkenine bağlı olarak köpük beton hücre boyutlarının önemli ölçüde değiştiği gözlenmiştir. Elde edilen görüntüler üzerinde ölçek çubuğu ve görsel incelemeler sonunda Çizelge 4.6’ da belirtilen hücre boyut dağılımları ölçülmüştür. Numunelerin hücre boyut ve şekilleri incelendiğinde birim ağırlık değerinin gözenek yapısı için önemli değişken olduğu gözlemlenmiştir. Bileşim farklılıkları olan 1 ve 2 numaralı serilerin birim ağırlıkları aynıdır. Resim 4.1’den de görüleceği gibi numunelerin hücre boyut, şekil ve dağılımları benzerlikler göstermektedir.

**Çizelge 4.7** Numunelerin birim ağırlığı ve hücre boyut aralıkları.

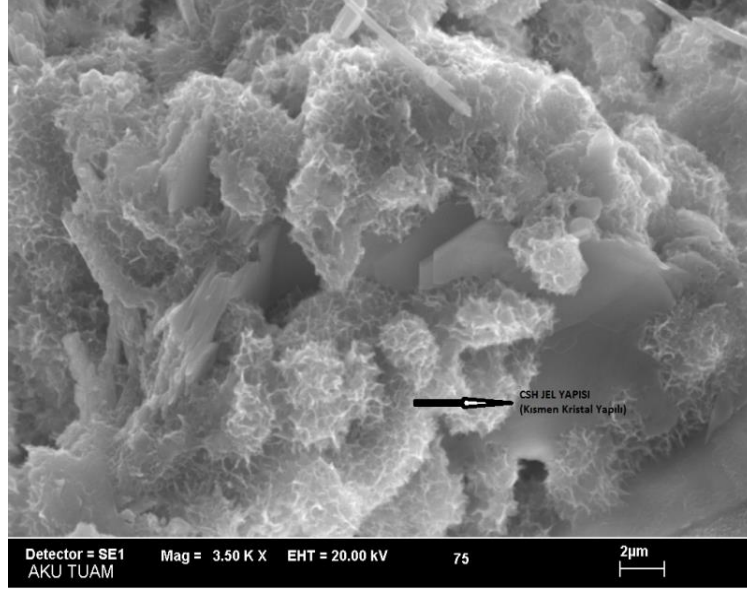
Seri No	Birim ağırlık (Kg/m <sup>3</sup> )	Hücre boyut aralıkları (µm)	
1	418	50-400	Resim a.
2	418	50-400	Resim b.
3	430	250-1200	Resim c.
4	440	400-1200	Resim d.

SEM ile elde edilen hücre yapısı resimleri incelendiğinde, birim ağırlığının artmasıyla köpük beton numunelerinin hücre boyutlarının büyüdüğü ve şekillerinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Hücre boyutlarındaki değişimlere bağlı olarak hücre duvarı kalınlıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Boyutlar büyüdükçe hücre duvar kalınlıkları azalmıştır (Resim 4.1).



**Resim 4.1** Köpük beton numunelerinin hücre yapıları (a) 418 kg/m<sup>3</sup>; (b) 418 kg/m<sup>3</sup>; (c) 430 kg/m<sup>3</sup>; (d) 440 kg/m<sup>3</sup> kuru birim ağırlıklı numune iç yapı görüntüleri.

Numunelerin içyapıları büyük görüntülemelerde incelendiğinde, genel olarak bileşim farklılıklarından bağımsız olarak benzer yapıların oluştuğu gözlemlenmiştir. Numune bileşimlerinde farklılıklar oluşturabilecek olan uçucu kül ilavesinin genel yapı içerisinde önemli bir farklılık oluşturmadığı izlenmiştir. Numunelerin genel içyapısı, çimento içerisindeki kalsiyum silikat fazlarının hidratasyonu ile oluşan kısmi amorf CSH jellerinden oluştuğu (Resim 4.2) ve bazı numunelerin tespit edilebilen yerlerinde ise tanımlanabilen plaka şekilli kristal CSH morfolojileri izlenmiştir (Resim 4.3).

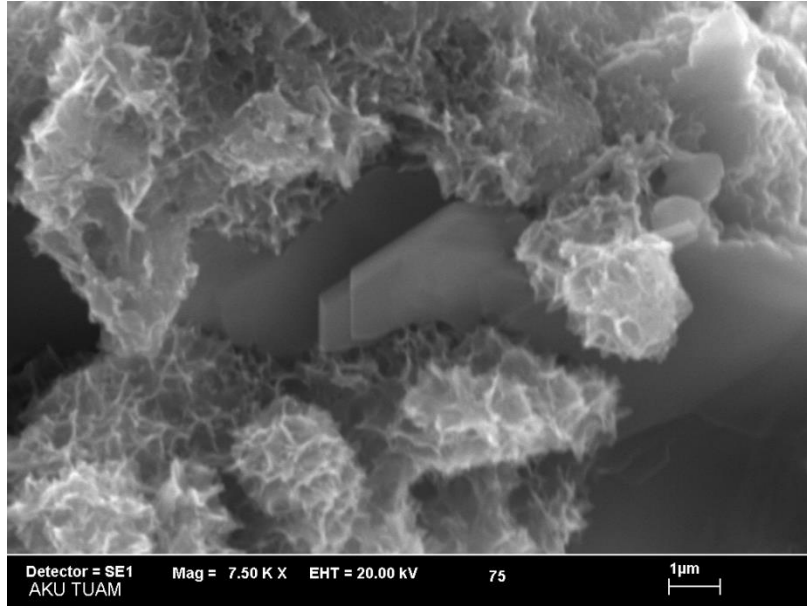


**Resim 4.2** Numune içyapılarında genel olarak izlenen kısmi kristal CSH Jel yapısı.

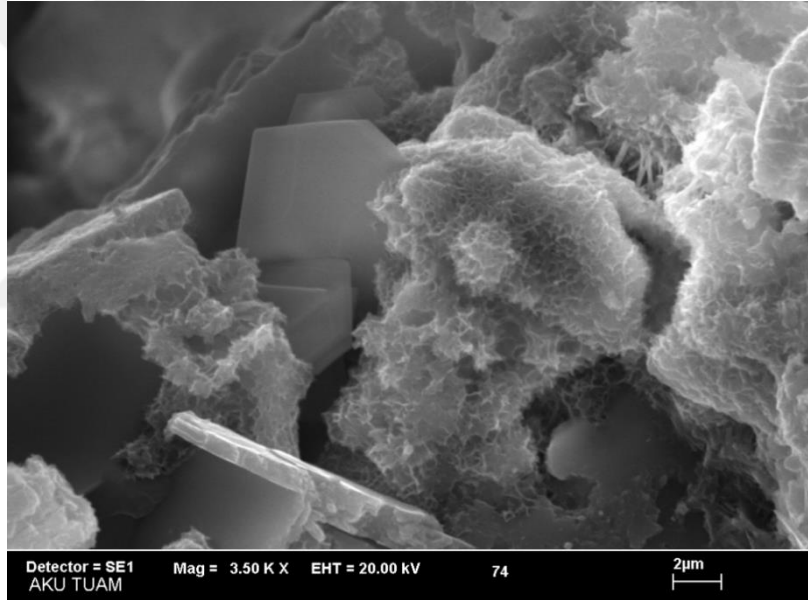


**Resim 4.3** Numune içerisinde gözlemlenen kristal CSH plaka oluşumları.

İncelemesi yapılan ve bileşim farklılıkları olan tüm numunelerin içyapıları görüntülerinde yaygın olan CSH jel yapısı ile birlikte portlandit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oluşumlarına rastlanmıştır. Portlandit yapısının belirleyici özelliği olan hegzagonal plakalar yapı içerisinde ayırt edici olarak gözlemlenmiştir (Resim 4.4). Genel olarak portlandit kristallerinin CSH jel yapısı içinde yer alması ve boyutları, kalsiyum silikat fazlarının ( $\text{C}_3\text{S}$  ve  $\text{C}_2\text{S}$ ) hidratasyonu ile ortaya çıkan yeniden kristalleşen  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  oluşumunu doğrular niteliktedir.



(a)



(b)

**Resim 4.4** (a), (b): CSH jel yapısı ile bir arada gözlenen portlandit yapıları.

Numune üretim aşamasında kullanılan polipropilen fiberlerin yapı içerisinde bütünlüklerini korudukları ve hidrasyon ortamından etkilenmedikleri gözlemlenmiştir (Resim 4.5).



**Resim 4.5** Köpük beton için kullanılan PP fiberlerin yapı içindeki görüntüsü.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 370-440 kg/m<sup>3</sup> görünür yoğunlukta köpük betonları, Portland çimentosu, uçucu kül, ince kum, hidrojen peroksit ve kimyasal katkıları kullanılarak hazırlanmıştır.

Ön deneme çalışmalarında özellikle kuru birim ağırlığı 370 kg/m<sup>3</sup> altında olan numunelerde çökme meydana gelmiştir. Karışımlarda hava kabarcıklarının birleşmesi göreceli olarak belirgin olduğu gözlemlenmiştir. 370 kg/m<sup>3</sup>' ten olan düşük kuru birim ağırlıklarda olan karışımlarda gözeneklerin birleşerek büyümesi gözlenmiştir. Düşük yoğunluklarda kabarcıkların birleşerek büyümesi nedeniyle köpük beton karışımlarında çökmeye sebep olmuştur.

Çalışmalarda kuru yoğunlukları 370-440 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen köpük beton ve köpüklenme ajanı olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılarak üretilmiştir. İstenilen yoğunluk ve gereken dayanım için malzeme karışım oranı tasarımını kesin olarak belirlemek için standart bir yöntem yoktur. Bununla birlikte hammadde özellikleri ve karışım oranları, katkıların miktar ve özellikleri, hammaddelerin karışıma eklenme sırası, uygun karıştırma prosedürü, ortam ve kür koşulları köpük betonun nihai özelliklerine etki eden faktörlerdir.

Normal hava şartlarında açık havada kürleme uygulanarak köpük betonun priz süreci tamamlanabilir ve yeterli dayanım elde edilebilmektedir. Alüminyum tozu kullanılarak geliştirilen köpük betonlarda kürleme otoklav kürü ile tamamlanmakta olup, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile geliştirme sonucu köpük beton üretiminde otoklav kürüne ihtiyaç duyulmamıştır.

TS 13655'te köpük beton minimum basınç dayanımı 1,5 MPa olarak verilmiştir. Uçucu kül katkısız dökümlerinde kuru birim ağırlığı 410 ve 415 kg/m<sup>3</sup> olan serilerde standart değerler elde edilmiştir. Birim ağırlığı 400 kg/m<sup>3</sup>' ün altındaki karışım serilerinde 1,05 ile 1,38 MPa arasında basınç mukavemet değerleri elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı serilerde 380-430 kg/m<sup>3</sup> aralığında yoğunluğa sahip numuneler üretilmiştir. Basınç dayanımları 1,55-1,78 MPa arasında değerler elde edilmiştir. Uçucu kül katkılı serilerde mukavemet değerleri ile önemli bulgu ortaya çıkmıştır. Buna göre uçucu kül katkısız numunelerde birim ağırlık değeri 400 kg/m<sup>3</sup> üzerindeki örneklerde standarda uygun basınç mukavemeti değerleri elde edilirken, uçucu kül katkılı örneklerde daha düşük birim ağırlık değerlerinde standarda uygun (min. 1,5 N/mm<sup>2</sup>) mukavemet değerleri elde edilmiştir. Diğer bir anlatımla uçucu kül katkısı köpük beton

numunelerinin basınç mukavemeti değerlerini artırdığı gözlenmiştir. Uçucu külün köpük betona bir dolgu maddesi olarak dahil edilmesi, hava boşluklarının ince kumdan daha düzenli dağılımını sağlamaya yardımcı olmaktadır. Uçucu kül daha incedir, her bir kabarcık üzerinde iyi ve düzgün bir kaplama sağlayarak ve birleşme ve üst üste binmelerini önleyerek hava boşluklarının düzgün bir şekilde dağılmasına yardımcı olmaktadır. Hava boşluğu dağılımı daha düzenli hale sahip olan karışımlar daha yüksek dayanım göstermiştir. Karışımlarda %20-40 aralığında 5'er arttırmak suretiyle uçucu kül dahil edilmiştir. %40'a kadar karışıma ilave edilen uçucu külün puzolanik özelliği ve ince tane boyut özelliğinin köpük beton numunelerinin mekanik özelliklerine önemli derecede katkısı gözlenmiştir. Karışıma %40 üzerinde katılacak uçucu kül miktarının köpük beton özelliklerine olan etkisi ayrıca araştırılması uygun olacaktır.

Köpük betonlarının sertleşme işlemi sırasında hava boşluklarının stabilitesini kontrol etmek için, çimento pastasının hidrasyonunu hızlandırmak için köpük stabilize edici emülsiyon CS, köpük beton içerisine hapsedilmiş hava kabarcıklarının yüzey gerilimini önemli ölçüde azaltabilir ve kabarcık kabuğunun dayanıklılığı ve esnekliği üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Burada boşlukların birleşmesini önleyici CS ilavesi ile boşluk yüzey enerjisi düşürülmüştür. Karışımlarda kullanılan CS ilavesinin etkisi farklı oranlarda karışıma ilave edilerek kontrol mekanizması araştırılabilmesi uygun olacaktır.

SA etkisi ve marsh konisi deneyleri döküm serilerinde örneklerin akış değerleri incelendiğinde SA katkısı olan örneklerde “düzenli akış” (1 dakikanın altında) gerçekleşmiştir. Buna karşı SA katılmayan (kontrol serisi) karışımlarda akış süreleri 1 dakika ile 2 dakika arasında kalarak “kesikli akış” göstermiştir. Bu etki köpük betonun gözenek dağılımını ve mukavemet özelliklerini de olumsuz etkilemiştir. Taze harç yoğunluğu azaldığında akış süresi uzamakta, diğer deyimle akışkanlık azalmaktadır. Akış süreleri azaldıkça (akışkanlık arttıkça) kalıba daha düzenli yerleşme ve homojen bir karışım sağlanması sonucu mukavemet gelişimi olumlu etkilenmiştir.

Köpük betonda çatlama olayı, köpük betonun priz alma sürecinde oluşan hidrasyon ısısının neden olduğu sıcaklık farkı ve köpük betonun düzensiz hacimli değişimi sebebiyle plastik rötre oluşabilmektedir. Karışımlarda çimento kütlelerinin %0,1 oranında PPL kullanılmış, üretilen köpük betonlarda rötre çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

Çalışmada üretilen köpük beton numunelerinde SA5-3 karışım nolu reçete ile üretilen örneklerde  $440 \text{ kg/m}^3$  kuru birim ağırlığa sahip numunelerde 2,78 MPa maksimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Burada numunelerin açık havada 28 gün günde 2 kez sulanarak kür işlemi tamamlanmıştır.



## 6. KAYNAKLAR

- Agarwal, SK., Masood, I., Malhotra, S.K., (2000). Compatibility of superplasticizers with different cements, *Construction and Building Materials*, **5**: 253–259.
- Aini, K., and Sani, A. (2017). Applications of Foamed Lightweight Concrete. *MATEC Web of Conferences*, **97**: 1–5.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete ; a review. *Construction and Building Materials*, **101**: 990–1005.
- ASTM C 618 (2003). Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a mineral admixture in Portland Cement Concrete, ASTM.
- ASTM D 4373 (1996). Standart Test Method for Calcium Carbonate Content of Soils, ASTM.
- Awang, H., Ahmad, M. H., Materials, A. (2014). Durability Properties of Foamed Concrete with Fiber Inclusion. *International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering*, **8**: 273–276.
- Awang, H., Mydin, A. O., Roslan, A. F. (2012). Effect of additives on mechanical and thermal properties of lightweight foamed concrete. *Advances in Applied Science Research*, **3**: 3326–3338.
- Bing, C., Zhen, W., & Ning, L. (2011). Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **24**: 113–118.
- Binici, H., Çağatay, İ.H., Kaplan, H. (2000). Değişik faktörlerin beton mukavemetine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **3**: 203-209.
- Chandni, T. J., & Anand, K. B. (2018). Utilization of recycled waste as filler in foam concrete. *Journal of Building Engineering*, **19**: 154–160.
- Cited, R., Silverberg, P. E., James, B., Verona, S. E., Data, R. U.-A., & Drawings, N. (1994). United States Patent Date of Patent: represented by the Secretary of the, 6–9.
- Çetmeli E. (1974). Yeni Alman Betonarme Şartnamesi (DIN 1045, 1972) Betonarme hesap esasları, kesitlerin boyutlandırılması ve donatının yerleştirilmesi, Uluğ Kitabevi, İstanbul.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Kuru, M. (2015). Farklı yoğunluklardaki köpük betonların dayanım ve ısı iletkenlik özellikleri. 9. Ulusal Beton Kongresi.

- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu S. (2010). Uçucu külün karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özelliklerine etkisi. *Selçuk Üniversitesi Teknik Dergisi*, **9**: 24-40.
- Ding, Y. and Ren, Q. (2011). Foamed concrete Research and Progress , *Concrete*, **10**: 13-16.
- Ducman, V., Korat, L. (2016). Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agents. *Materials Characterization*, **113**: 207–213.
- Erdoğan T. Y. (2015). Beton. Metu Press, 5. Baskı.
- Hamad Mohammed, 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.
- Hilal, A. A., Thom, N. H., & Dawson, A. R. (2015). On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. *Construction and Building Materials*, **85**: 157–164
- Huang, Z., Zhang, T., & Wen, Z. (2015). Proportioning and characterization of Portland cement-based ultra-lightweight foam concretes. *Construction and Building Materials*, **79**: 390–396.
- Gülşahin S. (2006) Taze Betonda Segregasyonun Ölçülmesi ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jones M. R., Mc Carthy A. (2003). Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective, in: Proceedings of the International Ash Utilisation Symposium, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, 20-22.
- Jones M. R., Mc Carthy A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. *The Science and Technology of Fuel and Energy*, **84**: 1398-1409.
- Jones, M. R., Zheng, L., Ozlutas, K. (2015). Stability and instability of foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, **68**: 1-8
- Kallunkal, G., & John, E. (2016). Optimization of foam concrete masonry blocks. *International Journal of Engineering Research and General Science*, **4**: 82-106.
- Kuzielová, E., Pach, L., & Palou, M. (2016). Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties. *Construction and Building Materials*, **125**: 998-1004.

- Liu, W. bin, & Zhang, X. (2017). Study on volume stability of chemical foaming cement paste. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **21**: 2790-2797.
- Li, T., Wang, Z., Zhou, T., He, Y., & Huang, F. (2019). Preparation and properties of magnesium phosphate cement foam concrete with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agent. *Construction and Building Materials*, **205**: 566-573.
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, **22**: 321-329.
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement Concrete Research*, **37**: 1341-1347.
- Ma, C., Chen, B. (2016). Properties of foamed concrete containing water repellents. *Construction and Building Materials*, **123**: 106-114.
- Masi, G., Rickard, W. D. A., Vickers, L., Bignozzi, M. C., & Van Riessen, A. (2014). A comparison between different foaming methods for the synthesis of light weight geopolymers. *Ceramics International*, **40**:13891-13902
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Bond properties of lightweight concrete - A review. *Construction and Building Materials*, **112**: 478-496.
- Mydin, A.O., C Wang, Y.C. (2010). An Experimental Investigation of Mechanical Properties of Lightweight Foamed Concrete Subjected to Elevated Temperatures up to 600°C. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, **1**: 142-157.
- Panesar, D. K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials*, **44**: 575-584.
- Pan, Z., Li, H., Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, **72**: 256-261.
- Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, **31**: 388-396.
- Ravi Shankar S., & Jijo Abraham Joy. (2015). Experiment on Foam Concrete with Quarry Dust as Partial Replacement for Filler. *International Journal of Engineering Research And*, **03**: 487-493.

- Şahin, M., Erdoğan, S. T., Bayer, Ö. (2018). Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide. *Construction and Building Materials*, **181**: 106-118.
- Tan, X., Chen, W., Hao, Y., & Wang, X. (2014). Experimental study of ultralight (<300 kg/m<sup>3</sup>) foamed concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-7.
- TS 13655, 2015. Kagir birimler – Özellikleri – Köpük beton kagir birimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1, 2011. Çimento - Bölüm 1: Agregaların kimyasal özellikleri için deneyler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2012. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206- 1, (2002). Beton- Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772- 1 (2012). Deney methodları- Bölüm 1: Basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 772- 13 (2002). Deney methodları- Bölüm 13: Kagir birimlerin net ve brüt kuru birim ağırlık kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2002. Kimyasal Katkılar - Beton, harç ve şerbet için, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tikalsky, P.J., Pospisil, J., MacDonald, W. (2004). A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete, *Cement and Concrete Research*, **34**: 889-893.
- Türkel, S. ve Kadiroğlu B. (2007). Pomza agregalı hafif taşıyıcı betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **3**: 353-359.
- Uygunoğlu, T., (2008). Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yuli, C., Fuguo, Q., Shuxiu, L., Haitao, Y. (2014). Effects of Hydrogen Peroxide on Foam Concrete Performances. *Applied Mechanics and Materials*, 1476-1749.
- Wee T., Babu D.S., Tamilselvan T. and Lim, H. (2006). Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *ACI Materials Journal*, **103**: 45-52.

- Wang, Z., Liu, L., Zhou, J., & Zhou, C. (2016). Impacts of potassium permanganate ( $\text{KMnO}_4$ ) catalyst on properties of hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) foamed porous cement slurry. *Construction & Building Materials*, **111**: 72-76.
- Xu. J., Zou, Y., Fan. Ming X, (2012). Effect of pore parameter on thermal conductivity of sintered LHP wicks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**: 2702-2706.
- Xulong and Qian G. (2011). Using chemical for foaming to foamed concrete preparation and research, *Concrete and cement products*, **12**: 1-3.
- Zhang, Jing. and Liu, Xiangdong. (2014). Effect of rare earth  $\text{Ce}_4+$  content on the properties and form mechanism of foamed concrete, *Bio Technology: An Indian Journal*, **10**: 20-24.



## İnternet kaynakları

- 1) <http://www.foamconcrete.co.uk/>, 25.02.2019
- 2) <https://www.meteoroloji.gov.tr/evlerin-insaat/kopuk-beton-ve-gaz-beton-bir-karsilastirma>,18.02.2019.
- 3) [http://inonu.edu.tr/media/iys/cmscontent/2073/2017/11/DENEY\\_2\\_\\_Do%C3%A7\\_\\_Dr\\_\\_M\\_\\_Burhan\\_Karako%C3%A7.docx](http://inonu.edu.tr/media/iys/cmscontent/2073/2017/11/DENEY_2__Do%C3%A7__Dr__M__Burhan_Karako%C3%A7.docx), 04.03.2019
- 4) [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/%C5%9Eantiyede%20Agrega%20Deneyleri.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/%C5%9Eantiyede%20Agrega%20Deneyleri.pdf),19.05.2018
- 5) [http://www.adacal.com.tr/tr-808164927-pt=401362053-ps=808443873/Kirec\\_Granul\\_Kirec](http://www.adacal.com.tr/tr-808164927-pt=401362053-ps=808443873/Kirec_Granul_Kirec),15.02.2019
- 6) [https://www.job-stiftung.de/pdf/versuche/H2O2\\_Decomposition.pdf](https://www.job-stiftung.de/pdf/versuche/H2O2_Decomposition.pdf), 15.04.2019

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan DEDE  
Doğum Yeri ve Tarihi : Gümüşhacıköy / 23.04.1993  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) : 0534 355 59 93 / hasandedd@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : İstanbul- Sabit Büyükbayrak Lisesi (2007 – 2011)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği (2012 – 2016)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İş Güvenliği Anabilim Dalı (2017 – 2018)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2016 – 2019)