



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KÖPÜK BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**HAZIRLAYAN
OSMAN HULUSİ ÖREN**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. OSMAN GENÇEL**

BARTIN-2017



T.C.
BARTIN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KÖPÜK BETON
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN
Osman Hulusi ÖREN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman	: Doç. Dr. Osman GENÇEL	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. Altan ÇETİN	- Bartın Üniversitesi
Üye	: Doç. Dr. Şenol GÜRSOY	- Karabük Üniversitesi

BARTIN-2017

KABUL VE ONAY

Osman Hulusi ÖREN tarafından hazırlanan “GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı bu çalışma, 05.07.2017 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Osman GENÇEL (Danışman)

Üye : Doç. Dr. Şenol GÜRSOY

Üye : Doç. Dr. Altan ÇETİN

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../2017 tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. H. Selma ÇELİKİYAY
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Osman GENCEL danışmanlığında hazırlamış olduğum “GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

05.07.2017

Osman Hulusi ÖREN

ÖNSÖZ

“Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi” adlı bu çalışma Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Yüksek Lisans tezinin bilimsel danışmanlığını üstlenen, konunun belirlenmesi ve çalışmanın hazırlanması esnasında yakın ilgi ve desteğini gördüğüm sayın hocam Doç. Dr. Osman GENÇEL’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında gerek maddi gerekse manevi olarak her zaman yanımda olan ve katkıda bulunan Muhammed ORAKÇIOĞLU, Doç. Dr. M. Sabri GÖK, Yük. Mak. Müh. Fethullah YILDIZ ve Ahmet GÜNEŞ’e teşekkür ederim.

Her zaman bütün imkânlarıyla maddi manevi yanımda olan ellerinden gelen bütün yardımı, desteği sağlayan başta annem Nuriye ÖREN, babam M. Celal ÖREN ve kardeşim M. Emin ÖREN’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yapmış olduğum bu çalışmanın gelecekte bu konuda yapılacak olan çalışmalara ışık tutmasını ve yol göstermesini dilerim.

Osman Hulusi ÖREN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN KÖPÜK BETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Osman Hulusi ÖREN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Osman GENÇEL

Bartın-2017, sayfa:, XIV + 70

Günümüzde beton en çok ve yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Bu nedenle beton teknolojisi oldukça gelişmiştir. Farklı amaçlar için özel betonlar geliştirilmiştir. Onlardan bir tanesi de köpük betondur. Köpük beton harç ve köpük ajanı kullanılarak üretilen köpüğün karışımı ile elde edilmektedir. Köpük beton oldukça yüksek oranda poroziteye sahiptir. Bu sayede ısı yalıtım performansı yüksek bir beton türüdür. Bu çalışmada bir endüstriyel yan ürün olan granüle yüksek fırın cürufu ve çimento dozajının köpük beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu kum ile %50 ve %100 oranlarında üretilen beton karışımlarında yer değiştirilmiştir. Çimento dozajı ise 300, 400 ve 500 kg/m³ kullanılmıştır. Üretilen betonlar üzerinde fiziksel, mekanik ve ısı testler gerçekleştirilmiştir. Karışım kompozisyonuna bağlı olarak birim hacim ağırlıklar 926–1132 kg/m³, basınç dayanımı 1–1.62 MPa ve ısıl iletkenlik katsayıları 0.208 –0.264 W/mK aralığında elde edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufunun kum yerine kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Dayanım için çimento miktarını arttırmaya gerek yoktur. Dayanım için porozite miktarının daha önemli oldu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çimento dozajı, granüle yüksek fırın cürufu, ısı yalıtımı, köpük beton

Bilim Kodu: 624.05.01

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF GRANULATED FURNACE SLAG ON PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

Osman Hulusi ÖREN

**Bartın University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Osman GENÇEL

Bartın-2017, pp: XIV + 70

Concrete, nowadays, is the most and widely used construction material. Concrete technology is highly improved. Special concretes have been developed for different purposes. One of them is foam concrete. It is produced by mixing foam and mortar. Foamed concrete has a high porous structure.

In this way it is a concrete type which has a high thermal performance. In this study, the effect of granulated furnace slag and cement content on properties of foam concrete was investigated. Granulated blast furnace slag was replaced with sand in concrete mixes produced in 50% and 100% proportions. Cement contents used were 300, 400 and 500 kg/m³. Physical, mechanical and thermal conductivity tests were done on the concretes produced. Bulk densities between 926–1132 kg/m³, compressive strengths between 1–1.62 MPa and thermal conductivity coefficients between 0.20–0.264 W/mK were observed by depending on the compositions of concretes. It was observed that granulated furnace slag can be used instead of sand. There is no need cement in order to increase strength of concrete. It was observed that porosity is more important for strength.

Keywords: Foam concrete, granulated furnace slag, cement content, thermal isolation.

Science Code: 624.05.01

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması	3
1.1.1 Üretim Şekillerine Göre	3
1.1.2 Dayanımlarına Göre	3
1.1.3 Ağırlığına Göre.....	4
1.2 Köpük Beton.....	4
1.2.1 Tanımlama ve sınıflandırma.....	5
1.2.2 Köpük beton üretiminde kullanılan malzemeler	6
1.2.3 Çimento	6
1.2.4 Mineral katkıları	6
1.2.5 Agregalar	7
1.2.6 Köpük Ajanları	8
1.2.7 Karışım tasarımı	9
1.2.8 Köpük betonun üretimi.....	10

1.2.9 Köpük betonun özellikleri	11
1.2.9.1 Taze Köpük Betonun Özellikleri	11
1.2.9.2 Sertleşmiş Köpük Beton ve Durabilite Özellikleri	14
1.2.10 Lifli Köpük Beton.....	21
1.2.11 Köpük Beton Uygulamaları.....	22
1.2.12 Araştırma İhtiyaçları.....	23
1.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu	24
1.3.1 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Elde Edilişi	25
1.3.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri	28
1.4 Uçucu Kül.....	29
 BÖLÜM 2 LİTERATÜR ÖZETİ.....	 31
 BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM	 39
3.1. Kullanılan malzemeler.....	39
3.1.1. Çimento	39
3.1.2 Agregalar	40
3.1.3 Köpük Ajanı	41
3.1.4 Alçı	42
3.1.5 Uçucu Kül.....	42
3.2 Karışım Oranları, Üretim ve Test	43
3.3 Uygulanan Deneyler	47
 BÖLÜM 4 BULGULAR VE TARTIŞMA	 50
 BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	 60

5.1 Genel Sonuçlar	60
5.2 Öneriler.....	62
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1. Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi	10
2. Yüksek fırın şeması.....	26
3. GYFC'nun granülasyon yöntemi ile elde ediliş şeması.....	27
4. YFC'nin peletleme yöntemi ile elde ediliş şeması.	27
5. Granüle yüksek fırın cürufu.	41
6. Kullanılan köpük ajanı.	41
7. Kullanılan alçı.	42
8. Köpük üretimi, (a) köpük ajanının suya ilave edilmesi, (b) köpük ajanı ile suyun karıştırılması, (c) elde edilmiş köpük.....	44
9. Harç üretimi.	45
10. Elde edilen harcın köpük eklenmeden görünüşü.	45
11. Köpük beton, (a) harcın köpüğe ilave edilmesi, (b) köpük ile harcın karıştırılması (c) elde edilmiş köpük beton.	46
12. Köpük betonun kalıplanması, (a) köpük betonun kalıba dökülüşü, (b) kalıplanmış köpük beton.....	47
13. Prizini tamamlamış köpük beton.....	47
14. Basınç dayanımı testi.	48
15. Ultrases geçiş süresi tayini.	48
16. Isıl iletkenlik katsayısı tayini.	49
17. GYFC'nun boyutsal dağılımı.....	50
18. Granüle yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü.	51
19. GYFC'nun XRD analizi.....	52
20. Uçucu külün XRD analizi.	53
21. Köpük betonların birim hacim ağırlıkları.	53
22. Köpük betonların basınç dayanımları.	54
23. Köpük betonların ultrases geçiş değerleri.	55
24. Köpük betonların porozite değerleri.	55
25. Köpük betonların su emme değerleri.	56
26. Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları değişimi.	56
27. Agregalar arasında köpüğün görünümü.	57
28. Agregaya yüzeylerinin köpük ile kaplanması.....	58

29.	Poroz yapı.	58
30.	Çatlak görünümü.	59

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
<u>No</u>	<u>No</u>
1. Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.....	3
2. Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.....	4
3. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.	39
4. Çimentonun kimyasal analiz sonucu.....	40
5. Agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri.....	40
6. Uçucu külün kimyasal ve bazı fiziksel özellikleri.	42
7. Köpük beton karışım oranları.....	43
8. GYFC'nun kimyasal analiz sonuçları (ağırlıkça %).	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	:	Mikro
μm	:	Mikrometre
MPa	:	Mega Paskal
$^{\circ}\text{C}$	:	Santigrad Derece
w/c	:	Water / Cement (su-çimento oranı)
s/c	:	Sand / Cement (kum-çimento oranı)
E	:	Statik Elastisite Modülü
f_c	:	100 mm Kürlenmiş Küp Numunenin Mukavemeti
R	:	Isıl Yalıtım
W/mK	:	Watt/ Metre Kelvin
m/s	:	Metre / Saniye
g	:	Gram
kg/m^3	:	Kilogram / Metreküp
p	:	Porozite
σ	:	Köpük Betonun Basınç Dayanımı
σ_p	:	Köpük Beton Üretiminde Kullanılan Harçın Basınç Dayanımını
A	:	Hava İçeriği
D	:	Yoğunluk
Al_2O_3	:	Aluminyum Oksit
CaO	:	Kalsiyum Oksit
SiO_2	:	Silikon Dioksit
MgO	:	Magnezyum Oksit
Fe_2O_3	:	Demir III-Oksit

K ₂ O	:	Potasyum Oksit
Na ₂ O	:	Sodyum Oksit
TiO ₂	:	Titanyum Oksit
CuO	:	Bakır Oksit

KISALTMALAR

ASTM	:	American society for testing and materials
ACI	:	American Concrete Institute
GYFC	:	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
ISO	:	International Organization for Standardization
SEM	:	Scanning Electron Microscope
UV	:	Ultraviyole
XRD	:	X-ray Işın Kırınım Cihazı
YFC	:	Yüksek Fırın Cürufu
BHA	:	Birim Hacim Ağırlık

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Modern dünyada beton en fazla kullanılan yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Bu nedenle beton teknolojisi sürekli gelişim göstermekte ve bu sayede tüm yıl boyunca en olumsuz iklim koşullarında bile beton imalatı ve dökümü gerçekleştirilmektedir. En genel anlamda su, çimento ve agrega karışımından oluşan geleneksel beton zamanla ihtiyaçlara cevap veremez hale gelmiştir. Bu da amaca yönelik beton kavramını ortaya çıkarmıştır. Yaşam standartlarının artması ve enerjiye olan ihtiyacın artması insanlığı nükleer enerjiye yönlendirmiştir. Tüm dünyada nükleer santrallerin kurulumu artmış ve günümüzde de hala artmaya devam etmektedir. Nükleer santrallerin inşasında geleneksel beton ihtiyaçları karşılayamadığından dolayı özel bir beton olan ağır betonlara gereksinim duyulmuştur. Yine değişen yaşam koşulları ve tarzları ile geleneksel konutlaşma yerlerini son zamanlarda yüksek katlı yapılara bırakmıştır. Ayrıca deprem gerçeği de göz önüne alındığında yüksek dayanımlı betonlara ihtiyaç doğmuştur. Ayrıca depreme dayanıklılığı sağlamak için donatı yoğunluğunun artması beton teknolojisinde sorun olarak ortaya çıkmış ve bu sorunun çözümü olarak da kendiliğinden yerleşen beton ortaya çıkmıştır. Yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde, endüstriyel zemin kaplamalarında yine özel bir beton türü olan polimer betonlar sıklıkla kullanılmaktadır. Betonun çok düşük olan çekme dayanımını arttırmak için beton içerisinde çeşitli lifler katılarak lifli betonlar üretilmiş ve bu liflerin beton içerisinde süreksiz dağılı halde olması ile betonun çekme dayanımı artırılmıştır. Bu örneklerden anlaşılacağı üzere mükemmel bir betonun olmadığı uygulanacak alana göre amacına yönelik beton kavramı ortaya çıkmaktadır. Bunlara özel betonlarda denilebilmektedir. Bu beton türlerinden bir tanesi de hafif betonlardır.

Betonarme yapılarda betonun zati yükünün azaltılması için hafif agregalı beton kullanılması üzerine uzun yıllardır çalışmalar devam etmektedir (Demirboğa vd., 2001). Hafif betonların yapılarda kullanılmasıyla yapıların tüm ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Bunun olumlu etkileri şu şekilde sıralanabilir: Yükün azalmasıyla taşıyıcı elemanların kesit boyutları küçülür. Ayrıca temel ile ilgili problemler çok daha kolay çözümlenir bir hal alır. Bütün bunların sonucunda da yapının maliyet bedeli azalmış olur. Fakat hafif betonlar asıl betonarme yapıların depreme dayanıklılığı arttırması bakımından yararlı işlev görmektedir.

Hafif betonların kullanılması durumunda yapının tüm ağırlığının azalmasından dolayı deprem olayı sırasında daha küçük dinamik kuvvetler oluşacaktır. Böylece yapıdaki dinamik etkilerin azalmasıyla ve bu dinamik etkilerin oluşturacağı gerilmelerin küçülmesiyle yapıların depreme dayanıklılığı artmış olacaktır (TS 2511, 1977; TS EN 206-1, 2002). TS EN 206-1’de (2002) hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), 800 kg/m^3 ’ten büyük, 2000 kg/m^3 ’ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilmektedir.

TS 2511’e (1977) göre de, karakteristik basınç dayanımı 17 MPa ’dan daha büyük olan ve birim hacim ağırlığı da en fazla 1900 kg/m^3 olan hafif agregalı betonlar, taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif betonların özellikleri, hafif beton üretiminde kullanılan agregaların karakteristik özellikleriyle doğrudan ilgilidir. TS 1114 EN 13055-1 (2004)’e göre hafif agregası, su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılan, gevşek birim ağırlığının en büyük değeri 1200 kg/m^3 ’ü veya tane yoğunluğu 2000 kg/m^3 ’ü aşmayan, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregalardır. Yine aynı standartta hafif agregalar tabii ve suni olarak iki sınıfa ayrılmış ve tanımları şu şekilde yapılmıştır:

Doğal agregası, mekanik işlem dışında herhangi bir işlemde geçirilmemiş olan ve mineral kaynaklardan elde edilen agregasıdır. Oluşumları sırasında gözenekli bir yapı kazanmış olan volkanik tüf, pomza (bims), sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. kırılmış veya kırılmamış agregalardır. Doğal hafif agregalar volkanik kökenli veya volkanik kökenli olmayan hafif agregalar olarak sınıflandırılmaktadırlar. Volkanik kökenli olan agregalar, lavın volkandan aşağı inerken havayla temasından dolayı aniden soğuması sonucu matlaşır. Bu nedenle kristalize bir yapıya sahip olmayıp yapıları düzensizdir. Bu tip hafif agregalar amorf veya camsı bir yapıya sahiptirler.

Yapay agregası, ısıtma işlemi veya diğer değişik endüstriyel işlemler sonucunda elde edilen mineral kökenli agregasıdır. Yapay agregalar, genleşme özelliği olan malzemelerin ısıtma işleminden geçirilmesi sonucu üretilen agregalardır. Vermikülit, perlit, arduvaz, şeyl, kil gibi agregalar yapay agregalara örnek olarak verilebilir.

1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların çok sayıda türleri bulunduğundan, değişik sınıflamalar yapılabilir. Üretim yöntemlerine ve kullanım alanlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmışlardır:

1.1.1 Üretim Şekillerine Göre

Hafif betonlar üretim yöntemine göre hafif agrega ile üretilen hafif betonlar, ince malzemesi olmayan betonlar, kimyasal katkı kullanımıyla üretilen hafif betonlar, köpük beton ve gaz beton olarak sınıflandırılmaktadır (Chandra ve Berntsson, 2002).

1.1.2 Dayanımlarına Göre

Hafif betonların basınç dayanımları açısından birçok sınıflandırılma yapılmıştır. Bunun nedeni de, hafif agregalı beton üretiminde dayanımları birbirinden farklı olan hafif agregaların kullanılmasıdır. Hafif betonlar, yalıtım için kullanılan düşük dayanımlı betonlar, dolgu amacı ile kullanılan orta dayanımlı hafif betonlar ve betonarme betonu olarak kullanılan yapısal hafif betonlar olarak üç gruba ayrılmıştır. TS EN 206-1 (2002)'de de hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Tablo 1 'de de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar sınıflandırılmışlardır.

Tablo 1: Hafif betonların basınç dayanımlarına göre sınıflandırılması.

Basınç dayanımı sınıfı	En düşük karakteristik dayanımı	
	Silindir, MPa	Küp, 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

Özellikle son yıllarda kimyasal katkıların önemli gelişimlerine paralel olarak yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlar üretilebilir hale gelmiştir. Tablo 1’de de görüldüğü gibi 80 MPa’lık basınç dayanımına sahip hafif beton üretilebilmektedir.

1.1.3 Ağırlığına Göre

TS EN 206-1 (2002)’de hafif betonlar birim hacim ağırlığına göre Tablo 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 kg/m^3 ’ten az ve 2000 kg/m^3 ’ten fazla olmaması gerekmektedir.

Tablo 2: Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması.

Yoğunluk sınıfı	D 1.0	D 1.2	D 1.4	D 1.6	D 1.8	D 2.0
Birim hacim	≥ 800	> 1000	> 1200	> 1400	> 1600	> 1800
Ağırlığı (kg/m^3)	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

Birim hacim ağırlığı 800 ile 1400 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları 10 MPa ’dan düşük olan hafif betonlar, yalıtım betonu; birim hacim ağırlığı 1400 ile 1600 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları da 16 MPa ’a kadar olan betonlar yarı taşıyıcı hafif beton; birim hacim ağırlığı 1600 ile 1900 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları da 17 MPa ’dan daha fazla olan hafif betonlar taşıyıcı veya yapısal hafif beton olarak da sınıflandırılmaktadır (Şimşek, 2004).

1.2 Köpük Beton

Yaklaşık iki bin yıl önce Romalılar, sıcak kireç ve su ile karıştırılmış küçük çakıl ve kaba kumdan oluşan bir beton karışımı üretiyorlardı. Karışıma hayvan kanı ilave ederek karışımın daha uygulanabilir ve dayanıklı olmasını sağlayan küçük hava kabarcıkları meydana geldiğini fark ettiler. Daha erken dönemlerde, yaklaşık 5000 yıl önce Mısırlıların benzer bir teknoloji kullanarak havayı betonda hapseden ürünler yaptıklarını gösteren kanıtlara rastlanmıştır (Aldrige, 2005). İsveç ve Danimarka’da 1900’lü yılların başlarında, hava ile karışan çimento esaslı malzemelerin imalatı, ticari olarak başlamıştır. 1923 yılına kadar Axel Eriksson tarafından patentli hale getirilen ilk Portland çimento bazlı köpük betona kadar bu alanda ve bu tarzdaki malzemelerle ilgili önemli bir gelişme olmamış ve ilerleme sağlanmamıştır (Beningfield vd., 2005; Jones ve McCarthy, 2005a).

Bu süreçte tutulan gaz, Portland çimentosu ve bazen de kireç içeren alkaline haline getirilmiş bir bulamaç karışımında hidrojen gazı (toz halinde alüminyum veya hidrojen peroksit kullanılarak) ile üretilmiştir. İkinci dünya savaşının sona ermesinden bu yana, kullanımı dünya çapında büyümüş ve üretim teknolojisinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir.

Çimento esaslı hücreli bileşikler artık malzemenin içinde havanın üç farklı şekilde oluşturulmasıyla üretiliyor. Bunlar; büyük miktarlarda hava tutan güçlü maddelerin eklenmesiyle, karıştırma işlemi sırasında gaz kabarcıklarını açığa çıkartan kimyasal katkı maddeleri vasıtasıyla veya köpük ajanlarının eklenmesiyle sağlanmaktadır (Beningfield vd., 2005; Goual vd., 2006).

Buna göre bu düşük yoğunluklu çimento esaslı betonlar, köpük beton ve gaz beton olarak sınıflandırılmaktadır. Hücreli mikroyapıları nedeniyle genel olarak bu tip betonlara hücreli beton denir.

Bu bölüm öncelikle köpüklü betonun üretimi ve özellikleri ile ilgilidir ve sadece diğer türlere kısa bir tanıtım burada sunulmuştur.

1.2.1 Tanımlama ve sınıflandırma

ACI 523.2R-96'ye (1996) göre, yaygın olarak hücreli veya gaz beton olarak adlandırılan malzeme:

“Portland çimentosunun kumlu cüruf veya uçucu kül gibi silisli ince malzemelerle kirecin, homojen bir boşluk ve hücreli yapıya sahip bir beton oluşturmak için suyla karıştırılmasıyla elde edilen hafif bir üründür. Hücreli yapı esas olarak bir gaz salınan kimyasal tepkime ya da mekanik diğer gazların bir araya getirilmesinden kaynaklanan makroskopik boşlukların dâhil edilmesiyle sağlanır.”

İngiliz Çimento Birliği, köpük beton "standart veya tescilli bir karıştırma tesisi kullanılarak çimento macunu veya harç bazlı karışım içerisine önceden oluşturulmuş bir köpük katarak üretilen hafif bir malzeme" olarak tanımlamıştır. Sıkışan hava kabarcıkları karışımın yoğunluğunu düşürür ve karışım üzerinde kuvvetli plastikleştirici etkiye sahiptir (British Cement Association, 1994).

Genel olarak, köpük betonun karışım bileşimi, çimento esaslı malzemelerden, kum, su ve içinde hapsolan havadan oluşmaktadır. Bu nedenle kaba agrega içermez. Cox ve Van Dijk (2002) ürünün köpüren sıradan beton olmadığını belirtmişlerdir. Gözenekler suyla seyreltilmiş bir köpükleştirici ajan ile karıştırılmasıyla elde edilir ve böylece mekanik olarak imal edilmiş bir köpük oluşturulur. Bu köpük daha sonra çimento bulamacı veya ana karışım ile dikkatlice harmanlanır (Cox, 2005). Alternatif olarak Kearsley çimentolu bir malzeme olarak tanımlamıştır; hacmin en az %20'si plastik harca giren köpükten oluşmaktadır (Kearsley ve Mostert, 2005b; 2005c).

1.2.2 Köpük beton üretiminde kullanılan malzemeler

Daha önce belirtildiği gibi köpük beton, Portland çimentosu, su, köpürtme ajanı ve diğer ince malzemelerden oluşmaktadır. Ayrıca çimento yerine geçen malzemeler, mineral ve kimyasal katkı maddeleri köpük betonda başarıyla kullanılmıştır. ACI 523.1R-06 (2006) tarafından önerilen tüm katkıların belirli bir karışım içindeki kararlı köpükle uyumlu olması gerekmektedir.

1.2.3 Çimento

Portland çimentosu, köpük betonun ana çimento unsurudur. Çimento dozajı 1400 kg/m^3 gibi yüksek bir seviyeden 75 kg/m^3 'e kadar düşük dozlarda uygulanabilir ancak uygulamada amaca göre genellikle 300 ile 500 kg/m^3 arasında kullanılmaktadır (British Cement Association, 1994; Jones ve McCarthy, 2005a; Papayianni ve Milud, 2005; ACI 523.1R-06, 2006). Normal Portland çimentosuna ek olarak, sertleşmiş Portland çimentosu, yüksek alüminyum çimento ve kalsiyum sülfatlı çimentolar, köpük betonda, sertleştirme süresini azaltmak ve erken dayanımı arttırmak için kullanılmıştır (Jones ve McCarthy, 2005a).

1.2.4 Mineral katkıları

Uygulamaya bağlı olarak, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, katı atıklar ve silis dumanı gibi çimento yerine kullanılan malzemeler köpüklü betonlara eklenmiştir (Kearsley, 1999a; Aldrige, 2005; Jones ve McCarthy, 2005a; Lee ve Hung, 2005; Papayianni ve Milud, 2005). Buna ek olarak, Proshin vd. (2005) ince öğütülmüş karbonat veya kuvarz

kumları şeklinde mineral katkıları kullanmıştır. Benzer şekilde Lee ve Hung (2005), köpük betonda pirinç kabuğu külü (puzolanik katkı olarak), genleştirilmiş polistiren (hafif agrega olarak) ve kâğıt çamuru (takviye olarak görev yapan kâğıt elyaf parçalarını içeren) gibi katı atıkların kullanımını araştırmıştır.

Çimento başarıyla uçucu kül ile değiştirilebilir (%80'e kadar) ve birçok çalışma da köpük betonun özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir (Kearsley, 1999a; Kearsley ve Wainwright, 2001b; Papayianni ve Milud, 2005). Ayrıca Kearsley ve Wainwright (2001b), sınıflandırılmamış kül olarak adlandırılan külü köpük beton üretiminde kullanmıştır. Bu külün yaklaşık % 40'ı 45 µm üstüdür. Araştırmaları, köpük betonda büyük miktarda bu külün kullanılabileceğini göstermektedir. Yüksek kül içeriği erken dayanımda bir azalma ile sonuçlansa da, % 75'e kadar çimento uçucu kül ile değiştirilerek uzun vadedeki dayanımı arttırdığı gözlemlenmiştir. Sınıflandırılmış kül için gözlenen eğilimler, Güney Afrika Standardına göre parçacıkların yaklaşık %12,5'inin parçacık büyüklüğü 45 µm 'ten düşük olan sınıflandırılmamış kül ile benzer olduğunu göstermiştir (Kearsley, 1999a; Kearsley ve Wainwright, 2002a; Kearsley ve Mostert, 2005a).

Portland çimentosuna, çimento kütlesi ile %30 ile %50 arasındaki seviyelerde, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu da eklenmiştir. Silis dumanı köpük betona %10'a kadar çimento kütlesi ile dâhil edilmiştir ve hava boşluk sisteminin kararlılığını etkilemeksizin düşük bir köpük yüzdesiyle (%30'a kadar) karışımların basınç dayanımının geliştirilmesinde etkili olduğu bulunmuştur. Ancak yüksek hacimdeki köpük (> %30) içeren bu karışımlarda silis dumanı etkisi belirgin değildir (Kearsley, 1996; Jones ve McCarthy, 2005a).

Katkı maddeleri kullanılırken ekonomiye, sürerliliğe, karışım kararlılığına ve bunların mukavemete katkısının uygunluğuna karar vermedeki faktörlere dikkat edilmelidir. Örneğin, uçucu külün yüksek hacimde kullanılması karışımın dengelenmesini engeller. Ancak bu durum köpük dengeleyiciler kullanarak önlenabilir.

1.2.5 Agregalar

Genel olarak iri agrega köpük beton üretiminde kullanılmaz. Maksimum parçacık boyutu 5 mm'ye kadar olan ince agregaların kullanılması önerilmektedir. Ancak ince agrega kısmı uçucu kül, kireç, tebeşir, ezilmiş beton, granit tozu, geri dönüştürülmüş cam, genleşmiş ve

polyester granülleri içeren kısmen veya tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemelerle değiştirilebilir (Kearsley, 1996; Jones ve McCarthy, 2005a; Lee ve Hung, 2005; Jones ve McCarthy, 2006). Tabii ki agrega fazı daha fazla hava kabarcığı ile değiştirilebilir. İnce agreganın tamamen köpük betondan çıkartılması pek yaygın bir yöntem değildir.

1.2.6 Köpük Ajanları

Köpük beton üretiminin iki ana yöntemi vardır. Birinci yöntemde önceden hazırlanmış köpük hazırlanan harçla karıştırılır. İkinci yöntemde ise karışım beton karışımı esnasında köpük oluşturma yöntemidir (Aldrige, 2005; Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Kullanılan köpükler ya sentetik ya da protein esaslı olabilir ve tescilli kaynaklardan temin edilebilir. Daha önce belirtildiği gibi Mısırlılar ve Romalılar, havayı beton içerisine entegre etmek için hayvan kanı kullanmışlardır. Bu gün ise protein bazlı köpüklerin temelinde rafine edilmiş hayvansal ürünler vardır. Sentetik köpükler ise amin ve amin oksitlerden, naftalin sülfonat formaldehit vb. oluşur. Bu ürünlerin bazıları çevre için tehlikeli olarak sınıflandırılan bir veya daha fazla madde içerebilir. Bu nedenle bu ürünlerin kullanımında özellikle de formaldehit kondensatlarına dayanan ürünler kullanıldığında dikkatli olunmalıdır (Timbrell, 2007).

Protein esaslı köpükleştirici maddeler daha güçlü, dayanımlı ve daha kapalı hücreli bir kabarcık yapısına neden olurken sentetik olanlar daha fazla genişleme ve dolayısıyla daha düşük yoğunluk üretmeye sebep olurlar (ACI 523.2R-96, 1996; Tikalsky vd., 2004). Buna ek olarak, protein esaslı köpükler, daha fazla miktarda havanın dâhil olmasına izin verir ve aynı zamanda daha kararlı bir hava boşluğu ağı sağlar (Beningfield vd., 2005). Genellikle protein esaslı köpükler daha kısa raf ömrüne (6 aya kadar) sahiptir; sentetik ajanların ise depolanma süresi bir yıla kadar ulaşabilir. Köpük beton üretmek için temel malzemelerle harmanlanmış olan önceden şekillendirilmiş köpük ıslak köpük ve kuru köpük olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir.

Islak köpük, 2-5 mm arasında çapa sahip bir kabarcık ağıyla sonuçlanan, ince hasır üzerine köpükleştirici maddenin (genellikle sentetik) bir solüsyonunun su ile püskürtülmesiyle üretilir. Islak köpük geniş bir kabarcık yapıya sahiptir ve nispeten kararlı olmasına rağmen düşük yoğunluklu (1100 kg/m^3 'ün altında) köpüklü beton üretimi için tavsiye edilmez.

Kuru köpük, tıraş köpüğüyle görünüş açısından benzerdir ve ıslak köpükten (1 mm'den daha küçük) daha küçük bir kabarcık boyutu dağılımına sahiptir ve son derece kararludur. Sentetik köpüklerin kullanımı daha kolaydır ve daha uzun süre depolanabilirler, fakat aşırı sıcaklıklara daha az duyarlıdırlar. Buna ek olarak daha ucuzdurlar ve üretmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Hayvansal protein kullanılan köpükleştirici ajanlar suyu içine alıp protein yapısında tutabilme kabiliyetine sahip olmasından dolayı hayvan proteinlerine dayanan köpüklerle daha güçlü betonlar üretebilirler. Hidratasyon işlemi sırasında bu su köpükten ayrılır ve çimento partikülleri tarafından kolaylıkla kullanılır. Bu durum hava kabarcığı etrafında hidratasyon ürünleri ağı oluşturarak güçlü bir mikroyapı oluşmasını sağlar.

1.2.7 Karışım tasarımı

Köpük beton tasarımı için standart bir yöntem bulunmamaktadır. Tasarım felsefesi, normal betona göre köpük beton teknolojisinde karıştırma oranları sadece belirtilen basınç dayanımı için değil belirli bir yoğunluk için de seçildiğinden farklıdır. Normal betonda olduğu gibi hava içeriği ne kadar yüksek olursa mukavemet o kadar düşük olur. Yine normal betonda olduğu gibi köpük betonunda mukavemeti çimento ve su karışımına bağlıdır. Bununla birlikte köpük betonda köpürtme ajanının türü ve içeriği hem taze hem de sertleşmiş malzemenin üzerimde önemli etkiye sahiptir. Uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı maddelerinin kullanılması hem taze hem de sertleştirilmiş beton özelliklerinde belirgin bir değişikliğe neden olacaktır (Kearsley ve Wainwright, 2002a; Aldrige, 2005; Jones ve McCarthy, 2005a; Kearsley ve Mostert, 2005a; Lee ve Hung, 2005; Papayianni ve Milud, 2005). Normal betonda su-çimento en önemli karışım parametrelerinden biri iken köpük beton teknolojisinde su/çimento oranına ek olarak agrega/çimento oranı, kum/çimento oranı da tasarım kriterleri olarak kullanılabilir.

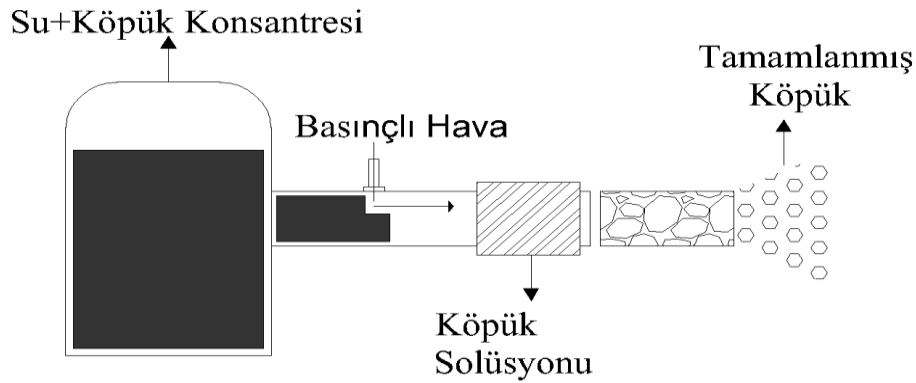
Köpüklü beton tasarımı için Kearsley ve Mostert (2005a) tarafından önerilen yöntem temel alınarak bir hedef döküm yoğunluğu, kum çimentosu ve uçucu kül çimentosu oranları seçilir ve su ihtiyacı hesaplanır. Bu değerleri ve temel maddelerin nispi yoğunluklarını kullanarak, çimentonun kütlesi ve gerekli yoğunluğu elde etmek için eklenmesi gereken köpük hacmi belirlenebilir.

1.2.8 Köpük betonun üretimi

Daha önce belirtildiği gibi hava boşluğu ağı, Portland çimentosunun ve bazen de kirecin dâhil edilmesi ile alkaline haline getirilen bir karışımda alüminyum tozunun kimyasal reaksiyonlarının bir sonucu olarak hidrojen gazı üretilerek elde edilebilir. Bu reaksiyonlarda, kalsiyum hidroksit ile alüminyum tozunun ve suyun reaksiyona girmesiyle hidrojen gazı açığa çıkar. Hidrojen gazı ham karışımı köpüğün hacmini ikiye katlar. Köpürme işleminin sonunda hidrojen atmosfere gider ve yerini hava ile değiştirir. Bu yöntemde dökümden sonra ve başlangıç seti yapıldıktan sonra malzeme çok yüksek basınçta buhar (180°C ile 210°C) altında sertleştirilir. Bu yöntem, çimento esaslı köpüklerin üretiminin en eski modern yöntemi idi ve 1920'de İsveç ve Danimarka'da tanıtıldı.

Günümüzde köpük beton, köpük ajanlarının beton karışımına eklenmesiyle üretilmektedir. Bu yöntem 1980'lerden beri kullanımdadır. Daha önce belirtildiği gibi, köpükleştirici maddeleri kullanarak köpük beton üretiminin iki temel yöntemi, önceden oluşturulmuş köpük ve karıştırma köpüğü yöntemleridir.

Önceden oluşturulmuş köpük yönteminde köpükleştirici madde bir köpük üreticisindeki karışım suyunun bir kısmı ile karıştırılır ve köpüğü oluşturmak üzere havalandırılır ve daha sonra karışıma ilave edilmeden önce köpürme püskürtücüsü vasıtasıyla yüksek bir basınca maruz bırakılmaktadır (Şekil 1). Önceden oluşturulmuş köpük yöntemi sulu bir yüzey etkinleştirici ve sıkışmış havadan meydana gelir (Jones ve McCarthy, 2005a). Karşım köpüğü yönteminde ise köpürtme ajanı çimento su ve ince agrega ile birlikte ana malzemeye eklenen bir malzemedir.



Şekil 1: Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

Genel olarak köpük beton üretimi çoğunlukla önceden oluşturulmuş köpük yöntemi ile yapılmaktadır. Üretimi üç bölüme ayrılır bunlar: harç hazırlığı, köpüğün önceden hazırlanması ve basınçlı hava kullanarak köpüğün üretilmesi (Hamidah vd., 2005). Kolaylık ve doğruluk için köpük üreticisi karıştırmadan önce kalibre edilmelidir. Köpük üretilirken çok büyük kabarcıkların oluşması istenilen bir durum değildir. Çünkü büyük kabarcıklar daha az kararlıdır ve bu nedenle beton karıştırılırken, taşınırken, yerleştirilirken ve gerekirse vibrasyon yapıldığında çökme olasılığı artar. Bu işlemler sırasında çok fazla hava kaybedilirse kalan hava boşlukları, oluşan köpüklü betonun beklenenden daha düşük bir performans göstermesine neden olabilir (Timbrell, 2007).

1.2.9 Köpük betonun özellikleri

Herhangi bir çimento esaslı ürün gibi, köpük betonun karakteristiği, karışım bileşimine kesinlikle bağlıdır. Bazı genel özellikleri şunlardır: yüksek dayanım/ağırlık oranı, düşük ısıl geçirgenlik katsayısı, düşük geçirimsizlik katsayısı, yüksek donma çözünme direnci, rijit ve iyi bağlanmış mikroyapı, düşük rötire, ısı yalıtımı ve darbe emme kapasitesi. Normal beton davranışları köpük betonunkinden oldukça farklıdır. Bu nedenle amaca göre üretilen köpük betonların özellik ve davranışları iyi gözlemlenmelidir.

1.2.9.1 Taze Köpük Betonun Özellikleri

İşlenebilirlik ve Su İhtiyacı

Taze köpük beton serbestçe akan, kendiliğinden yerleşen ve kendiliğinden yayılan bir materyal olduğu için çökme üretmesi beklenir, ancak bir tiksotropik davranış sergilediği bilinmektedir (British Cement Association, 1994). Pompalanması kolaydır ve en sınırlı ve düzensiz boşluklara akar (British Cement Association, 1994; Jones ve McCarthy, 2005a). Karıştırma süresinin etkisi çok önemlidir. Genellikle karıştırma süresi ne kadar yüksek olursa, hava akışı da o kadar fazla olur. Bununla birlikte, maksimum hava içeriğine (kritik sınır) ulaşıldığında, daha fazla karıştırma, tutulan havanın kaybedilmesine neden olabilir. Bu davranış, köpüğün veya havayı tutan maddenin miktarına, türüne ve verimine bağlıdır (Beningfield vd., 2005).

Çökme testi, yaklaşık 200 mm'yi aşan değerler için uygun bir işlenebilirlik ölçütü olmadığından, köpük betonda kullanılan yapılandırıcı malzemelerin su talebi bir akış tablosu testi kullanılarak belirlenmelidir (Beningfield vd., 2005; Kearsley ve Mostert, 2005a).

Karışım içeriğine, kıvam gereksinimlerine, kimyasal katkıların kullanımına ve köpük kararlılığına bağlı olarak su-çimento oranı (w/c) tipik olarak 0.4 ila 0.8 arasındadır (Kearsley ve Booyens, 1998; Jones ve McCarthy, 2005a). Su-çimento oranı, köpüğün verilmesinden önce 0,35'in altında olmamalıdır. Karışımında çok az su kullanılması çimentonun nem ihtiyacını köpükten karşılayıp betonun kısmen veya tamamen çökmesine neden olabilir (Wee vd., 2006).

Genel olarak normal betonda olduğu gibi, daha yüksek köpüklü beton yayılımları daha yüksek su-çimento oranları ile elde edilir ve kıvamı, betonun plastik yoğunluğunda bir düşüş ile azaltılır. Hava kabarcıklarının varlığı ve kaba agrega bulunmaması nedeniyle, genellikle köpük beton, segregasyon olmaksızın daha yüksek bir kıvama sahiptir. Bununla birlikte, köpük betonda mineral katkısı olarak granüle yüksek fırın cürufu kullanıldığında bazı köpük düzensizlikleri ve karışımında segregasyon meydana geldiği gözlenmiştir (Jones ve McCarthy, 2005a).

Kearsley ve Mostert (2005a), uçucu küle az miktarda kum (%25'den az) eklendiğinde, su içeriğini ayarlamak için ek bir suya ihtiyaç duyulmadığını ve köpük betonda kullanıma uygun olduğunu keşfetmiştir. Öte yandan, %25'i (hacimce) aşan kum içeren karışımlarda su ihtiyacının önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

Kumun uçucu kül ile değiştirilmesinin kayma akımının verim değerlerini önemli ölçüde azalttığı ve plastik yoğunluktaki herhangi bir artışın, plastik viskozitenin düşmesine neden olduğu görülmektedir (Jones ve McCarthy, 2005a). Köpük betonun akış davranışı temel olarak köpük hacmine bağlıdır ve köpük hacminin artmasının akışta düşüşe neden olduğu bildirilmektedir (Jones ve McCarthy, 2006; Nambiar ve Ramamurthy, 2006). Ayrıca çimento içeriği köpük betondaki hava boşluğu miktarı üzerinde önemli etkiye sahiptir ve çalışmalar göstermiştir ki çimento miktarının artmasıyla hava içeriği azalmıştır (Beningfield vd., 2005).

Yoğunluk

Köpük betonun birçok özelliği ve uygulamaları yoğunluğuna bağlıdır. Ağırlığın kendisi yapısal bir meseleyken köpüklü betonun uygulanmasında doğal olarak yoğunluk çok önemlidir. Köpüklü betonun kuru yoğunluğu 48 kg/m^3 kadar düşük ve 1800 kg/m^3 kadar yüksek olabilir (Kearsley ve Wainwright, 2001b; Jones ve McCarthy, 2005a; Timbrell, 2007). Kearsley ve Mostert (2005a), taze yoğunluk ve köpüklü betonun kuru yoğunluğu arasında farklı kül içeriği de dâhil olmak üzere farklı karışım tasarımları için doğrusal bir ilişki bulmuştur.

Hidratasyon Isısı

Hücrel mikroyapıya sahip çoğu katı madde gibi köpük beton da çok iyi bir termal yalıtıcıdır. Jones ve McCarthy (2005a) yoğunluğu 1400 kg/m^3 'den 1000 kg/m^3 'e değiştirerek çukurlarda çekirdek yüzey sıcaklığının 10°C 'den 20°C 'ye yükseldiğini gözlemlemişlerdir ve çukurların tabanında ise 1400 kg/m^3 'de en yüksek sıcaklığın 45°C , 1000 kg/m^3 'te en yüksek sıcaklığın 50°C olduğunu ifade etmişlerdir. Yoğunluğun azaltılmasıyla, düşük yoğunluklu köpük betonun yalıtım kabiliyetinin daha yüksek olmasından dolayı sıcaklıktaki düşüş hızının yavaşladığı da görülmüştür. Uçucu külün kullanımı, köpük betonda sıcaklığı ve sıcaklık artış oranını azaltmada çok etkilidir.

Kürleme

Beton sertleştikçe içindeki kabarcıklar şekil değiştirir veya parçalanır ve bu gerçekleşirken suyunu serbest bırakarak çimentonun bu suyu emmesine sebep olur. Bu sadece hidratasyon işlemine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda önceden su ile doldurulmuş gözenek ağında hava boşlukları oluşturur. Bu nedenle, suyla kürlenmiş numunelerin kıyaslanmasında kürleme esnasında beton nemini korumaya daha az ihtiyaç vardır. Kuru kürleme ile karşılaştırıldığında su ile kürlenmiş numunelerde daha yüksek mukavemet elde edilmiştir (Jones ve McCarthy, 2005a). Ayrıca uçucu kül içeren karışımlarda iyi kürlenmiş numunelerde uzun vadeli mukavemet kazanımı daha yüksek olarak gözlemlenmiştir (Kearsley ve Wainwright, 2001b).

Kearsley ve Mostert (2005b), farklı k rleme rejimlerinin uçucu külün köpük beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. Yaptıkları araştırmanın sonuçlarına göre, yüksek sıcaklıktaki bir k r rejimi, yüksek hacimli uçucu kül içeren karışımların mukavemet kazanma oranını önemli ölçüde artırılabildiğini fakat nihai mukavemetin düşük olmasına sebep olduğunu ortaya koymuştur.

1.2.9.2 Sertleşmiş Köpük Beton ve Durabilite  zellikleri

Basınç Dayanımı

Köpük betonun basınç dayanımı ağırlıklı olarak yoğunluğundan etkilenir ve köpük betonun yoğunluğunda meydana gelen azalma ile katlanarak azalır. Basınç mukavemeti 0,34 MPa kadar düşük veya 20 MPa kadar yüksek olabilir. Uçucu külün yüksek yoğunluklu köpük betonda (1500 kg/m^3) uygulanmasıyla 50 MPa'dan fazla nihai mukavemetler elde edilmiştir (Kearsley ve Wainwright, 2001b).

Kearsley ve Wainwright (2002b), normal betonda olduğu gibi, köpük betonun porozite ve basınç dayanımı arasında bir korelasyon olduğu ve beton porozitesinde bir azalmanın mukavemetinde bir artışa neden olduğu sonucuna varmıştır. Belli bir köpük beton yoğunluğunu elde etmek için gereken boşlukların hacmini azaltarak daha yüksek basınç dayanımı elde edilebilir. Bu, köpük betonun imalatı için düşük yoğunluklu maddeler seçilerek yapılır (Kearsley ve Mostert, 2005b).

Köpüklü betonun basınç dayanımı aslında yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Dolgu, uçucu kül ve  imento içeriğinin basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi yoktur gibi görünmektedir (Kearsley ve Wainwright, 2001b; Kearsley ve Mostert, 2005a). Ancak Papayianni ve Milud (2005), yüksek kalsiyumlu uçucu külün köpüklü betonun basınç dayanımını arttırdığını göstermiştir.  imentoyu %70'e varan oranlarda yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile değiştirerek basınç dayanımı üzerine çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlar, uçucu kül içeriğindeki bir artış ile uçucu kül içermeyen referans köpük betona kıyasla basınç dayanımının arttığını göstermektedir. Bu artış 90 günlük olgunluğa kadar devam etmiştir. Uçucu külde ( imentonun iki katı) puzolanik reaktivite ile birlikte daha yüksek su tutma oranının, hücresel betonda bir bağlayıcı olarak uçucu külün üstün performansına katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Ayrıca Kearsley ve Wainwright'ın (2002a)  alışmalarında daha

kaba bir uçucu kül kullanıldığında, uçucu kül miktarı yüksek olduğu zaman uzun süreli dayanımın arttığı görülürken erken basınç mukavemetinde azalma gözlemlenmiştir. Köpük betonda çimento esaslı dolgu maddeleri kullanıldığında sıkıştırma gücünün uzun vadede artmaya devam ettiği bildirilmektedir (Jones ve McCarthy, 2005b). Kireç ve geri dönüştürülmüş cam gibi diğer bazı ince agregaların kullanılması basınç dayanımı üzerinde çok az veya hiç etkisinin olmadığı görülmektedir (Jones ve McCarthy, 2005a).

Köpük betonda su azaltıcı kimyasal katkı maddeleri köpüğün stabilitesini yani kararlılığını bozduğu için genellikle kullanılmamaktadır. Köpük betonda su/çimento oranındaki küçük değişiklikler basınç dayanımını normal betonda olduğu gibi ciddi şekilde etkilemez.

Köpük beton, plastik yoğunluğu ile karakterizedir (Jones ve McCarthy, 2006). Başka bir deyişle, boşlukların hacmi, su/çimento oranının yanı sıra mukavemetin önemli bir belirleyici parametredir. Ayrıca, su içeriğinin artırılmasının mukavemette bir artış ile sonuçlandığı ve boşluk içeriğinin etkisinin su-çimento oranının köpük betonun mukavemeti üzerindeki etkisine karşı koyduğu görülmektedir. Bunun nedeni, köpüklenen beton genellikle istenen bir yoğunluğa dayalı olarak tasarlanmıştır; düşük yoğunluğa sahip olan su hedef yoğunluğa ulaşmak için eklenen köpük ile azalır (Kearsley ve Mostert, 2005a). Su-çimento oranına ters orantılı olan basınç dayanımı köpüklü beton durumunda bir miktar farklılık göstermektedir. Köpük betonun basınç dayanımı, su-çimento oranına bağlı değildir, daha çok köpük içeriğine bağlıdır.

Düşük yoğunluklu köpük betonun basınç dayanımı, çimento içeriğini artırarak yüksek yoğunluklu köpük betonunkine eşit seviyeye çıkarılabilir (Hamidah vd., 2005). Öte yandan daha yüksek kum-çimento oranı (s/c), daha düşük bir basınç mukavemetine neden olur (Hamidah vd., 2005; Wee vd., 2006).

Daha önce belirtildiği gibi, köpük betonun basınç dayanımı, kullanılan köpükleştirici maddenin türüne bağlıdır ve protein bazlı köpük ajanını sentetik bazlı köpük ajanına göre basınç mukavemetini daha fazla artırmıştır (Jones ve McCarthy, 2005a). Köpük betonun özelliklerinin karşılaştırılmasında köpürme maddesinin türü önemlidir ve sadece aynı tür köpürme maddeleri ile olan karışımlar karşılaştırılmalıdır.

Elastisite Modülü

İri agregaya içermeyen bir sistem için beklendiği gibi, köpük betonun statik elastisite modülü normal betonunkinden daha düşüktür. 500 kg/m³'ten 1500 kg/m³'e kadar olan kuru yoğunluklarda köpük betonun elastisite modülü 1000 MPa ile 8000 MPa arasındadır. Jones ve McCarthy (2005b), çeşitli ince agregalara sahip köpük betonun elastisite modülünü belirlemek için aşağıdaki gibi denklemleri kullandılar:

$$\text{İnce Kum Agregalar için: } E = 0.42 f_c^{1.18} \quad (1)$$

$$\text{İnce Uçucu Kül Agregaları için: } E = 0.99 f_c^{0.67} \quad (2)$$

E: Statik Elastisite Modülü (kN/mm²)

f_c: 100 mm Kürlenmiş Küp Numunenin Mukavemeti

Hava kabarcıklarının köpük betona ilavesi basınç mukavemeti üzerinde elastisite modülüne olduğundan daha yüksek bir etkiye sahiptir.

Termal Özellikler

Köpük beton düşük ısı iletkenliğe sahiptir ve bu özelliği köpük betonu iyi bir yalıtım malzemesi yapar. Bunun temel sebebi hücrel boşluklu yapıya sahip olmasıdır. Isı direnci (yalıtkanlık ölçüsü olarak) R = 2 ile R = 4 arasındadır. Normal betonlar ise R = 1'den daha düşük değerlerde ısı direncine sahiptir. Köpüklü betonun ısı iletkenliği değerleri, normal beton için ölçülenlerin %5 ile %30'u arasındadır.

Kuru yoğunluğu 600 kg/m³ ile 1600 kg/m³ arasında olan köpük betonlarda ısı iletkenlik değeri 0.1 W/mK ile 0.7 W/mK arasındadır. 1000 kg/m³ ile 1200 kg/m³ kuru yoğunluğa sahip köpük betonlarda yoğunluğun azalmasıyla ısı iletkenlik değeri 0.42 W/mK ile 0.23 W/mK aralığına kadar azalır (ASTM C796–04, 2004; Jones ve McCarthy, 2005a).

Dikkat edilmesi gereken bir husus, yüksek hacim/yüzey oranı olan elemanlarda köpük beton kullanılırsa, bu malzemenin düşük ısı iletkenliği hidrasyon ısısına bağlı olarak çekirdek sıcaklığında bir artışa ve çatlamaya neden olabilir.

Porozite

Köpük betonun gözenek yapısı: jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve hava boşluklarından (hapsedilmiş hava) oluşur. Köpük beton kendiliğinden sıkışma özelliğine sahip olduğundan ve kendi kendine akan yapısından dolayı havanın hapsolma olasılığı ihmal edilebilir.

Hoff (1972) ve Kearsley ve Wainwright (2002b) ve Wee vd. (2006) köpük beton için porozitenin basınç dayanımı üzerindeki etkisini gösteren kuvvet-porozite ilişkileri geliştirmiştir. Geliştirdikleri model, beton porozitesinde bir azalmanın, mukavemette bir artışa neden olduğunu göstermektedir.

Kearsley ve Wainwright (2002b) porozite ile dayanım arasındaki ilişkiyi veren denklemi aşağıdaki gibi belirtmişlerdir. Denklemden f_c basınç dayanımını ve p poroziteyi simgelemektedir.

$$f_c = 981e^{-7.43p} \quad (3)$$

Benzer bir denklemi Wee vd. (2006) önermiştir. Önerdikleri denklem aşağıda belirtilmiştir.

$$\sigma = 1.262 \sigma_p(1-A)^{2.962} \quad (4)$$

Burada σ köpük betonun basınç dayanımını, σ_p köpük beton üretiminde kullanılan harçın basınç dayanımını, A ise hava içeriğini temsil etmektedir.

Nambiar ve Ramamurthy (2007), köpük betonun hava boşluğu ağırlığını ölçmüş ve boşlukların hacmi, boyutu ve aralığının çimento esaslı köpük betonun yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. Fakat hava boşluklarının şeklinin mukavemet üzerinde bir etkisinin olmadığını ifade etmişlerdir (Wee vd., 2006; Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Ayrıca daha yüksek hava içeriğine sahip betonlarda, özellikle hava içeriği %40'ı geçen köpük betonlarda daha büyük boyutlu hava boşlukları bulunur. Kullanılan materyaller hava boşluk ağırlığının yapısını etkiler, uçucu kül kullanılması daha iyi üniform dağılıma sahip hava boşlukları oluşmasını sağlar ve ince kum kullanımı da önerilmektedir.

Yangın Direnci

Betonda yüksek sıcaklık nedeniyle mukavemet kaybı öncelikle çimento tipinden ve agrega türünden etkilenir. Köpük betonun yangına dayanıklılığı çok iyidir ve düşük sıcaklıklarda normal ağırlıklı betonun yangın direncinden daha iyi performans göstermektedir.

Kearsley ve Mostert (2005c), yüksek alüminyum oksitli çimento ve kaba taneli uçucu kül kullanılan köpük betonun yangın direncini araştırdılar. Uçucu kül, agrega, çimento tipinin yangın direncini etkileyebileceğini gözlemlediler. Hidrolik çimento içeren köpük beton 800°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Al_2O_3/CaO oranı 2'den yüksek olan çimento ve andalüsit agregalarını içeren karışımlar herhangi bir hasar belirtisi göstermeksizin 1450°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilir. Ayrıca 500 kg/m³ yoğunluğa sahip alkalin portland çimentosu kullanılan köpük betonların ateşten önceki basınç mukavemeti 5 kat daha fazla olarak ölçülmüştür (Krivenko vd., 2005). Ancak daha yüksek sıcaklıklarda çimento esaslı köpükler aşırı büzölmeye uğrar ve araştırmalar bu alanda devam etmektedir (Jones ve McCarthy, 2005a).

Rötre

Köpük beton genel olarak fazla çimento pastasına sahip olduğu için ve iri agrega içermediğinden rötresi normal betona göre daha yüksektir. Araştırmalarda köpük betonda plastik rötre rapor edilmemiştir, fakat çimento tabanlı köpük betonların kuruma rötresi %0.1 ile %0.35 arasında olabilmektedir. Daha düşük birim hacim ağırlıklı köpük betonların büzölme oranı daha fazla olabilmektedir (British Cement Association, 1994; Jones ve McCarthy, 2005a).

Papayianni ve Milud (2005) çimentonun %70 oranında yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile değiştirilmiş köpük betonun kuruma rötresini incelemişlerdir. Bu tip uçucu külün %60 oranında çimento ile değiştirilmesiyle elde edilen köpük betonun kuruma rötresi 1800 µm'den 1200 µm'e düşmüştür. Ayrıca mukavemetin artmasıyla rötre azaldığını tespit etmişlerdir. Kearsley (1999a) tarafından kaba taneli uçucu kül kullanarak köpük betonun kuruma rötresini azaltmaya yönelik benzer sonuçlar bildirilmiştir.

ACI 523.2R-96 (1996) köpük betonların ortalama kuruma rötrelerini %0.2 olarak sınırlandırmaktadır. Kum/çimento oranı 2, su/bağlayıcı oranı 0.65 – 0.70 aralığında ve kuru birim hacim ağırlığı 1500-1600 kg/m³ olan köpük betonun kuruma büzülmesi %0.09'dan daha az olduğu rapor edilmiştir (Lee ve Hung, 2005).

Su emme

Köpük betonun su emme kapasitesi birim hacim ağırlığına bağlıdır. Kütlesel olarak belirtildiğinde birim hacim ağırlığın azalmasıyla su emme kapasitesi artar. 1800 kg/m³ birim hacim ağırlıkta % 15'e kadar düşük ve 700 kg/m³ yoğunlukta % 35 gibi yüksek bir değer olabilir. Kum yerine uçucu kül içeren köpük betonların su emme kapasiteleri daha yüksek değerler almaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2006; Wee vd., 2006).

Agreganın karışımdaki varlığına göre aynı su-çimento oranına sahip betonlarda su emilimi üzerinde etkisi vardır. Su emme esasen çimento hamuru tarafından etkilendiğinden dolayı kısmen daha düşük çimento hamuru hacmi içeren karışımlar daha küçük kılcal boşluk hacmine sahip olmaktadır. Köpük beton üzerinde yapılan su emme testlerinde uçucu kül içeren karışımlar ince kum içerenlere göre daha yüksek değerler vermiştir (Jones ve McCarthy, 2005a; 2005b). Düşük yoğunluklar için emilim değerindeki artış malzemenin kendisinin daha düşük ağırlığından kaynaklanır. Ayrıca hacim temelinde su emilimi köpük betonun yoğunluğuna bakılmaksızın eşit su-çimento oranlarında neredeyse benzer sonuçlar vermektedir.

Geçirgenlik

Köpük betonun geçirgenlik indekslerinin (hava geçirgenliği, oksijen geçirgenliği ve su geçirgenliği) birim hacim ağırlıkta meydana gelen bir düşüş ile arttığı bilinmektedir. Köpük betonun geçirgenliğindeki artış normal betonlara göre daha hızlıdır (Kearsley ve Booyens, 1998; Kearsley ve Wainwright, 2001a; Jones ve McCarthy, 2005a; Kearsley ve Mostert, 2005a; Lee ve Hung, 2005). Bununla birlikte, Kearsley (1998; 1999a) ve arkadaşları, 1500 kg/m³ yoğunluğundaki köpük betonun oksijen geçirgenliğinin, 25 MPa'lık bir basınç dayanımına sahip bir normal ağırlık betonunkinden daha az olduğunu bildirmiştir. Dolayısıyla yüksek birim hacim ağırlıklı köpük beton normal beton kadar durabiliteye sahip olabileceği anlaşılmakta olduğunu belirtmişlerdir. ISO/DIS 7031'e göre ölçülen bazı tipik

köpük beton numunelerinin su geçirgenlik katsayısı 10^{-10} m/s'nin altında olup bu numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları 1500-1600 kg/m³ aralığındadır.

Donma-Çözülme Dayanımı

Köpüklü betondaki hava boşluğu ağı donma esnasında hidrolik ve ozmotik basınç için ek alan oluşturduğundan çok iyi bir donma-çözülme direncine sahiptir (Jones ve McCarthy, 2005a).

Jones ve Giannakou (2004), farklı köpük beton karışımlarının kum veya kaba uçucu kül ile ince agrega olarak ve ayrıca çimentonun bir kısmını ince uçucu kül ile değiştirdikten sonra donma-çözülme direncini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonucunda çimentoya ilave olarak ince uçucu külün kullanılmasının donma-çözülme direnci üzerinde bir etkisi olmadığını ifade etmişlerdir. 1000 kg/m³ kuru birim hacim ağırlığına sahip köpük betonun 1400 kg/m³'e göre test esnasında daha fazla hacim genleşmesi gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca test sonunda daha fazla basınç dayanımına sahip olduğunu da gözlemlemişlerdir. Bunun sebebinin daha fazla gözenek hacmine sahip olmasıdır.

Önceden köpürtülmüş hücreli betonun donma çözülme direncinin değerlendirilmesi için bir yöntem, Tikalsky tarafından ASTM C666 test yöntemine dayanılarak tanıtılmıştır (Tikalsky vd., 2004). Çalışmalarının sonuçları, soğurma derinliğinin, donma-çözölmeye dirençli köpüklü beton geliştirmek için anahtar olduğunu göstermektedir. Basınç mukavemeti, başlangıç penetrasyon derinliği, absorpsiyon ve absorpsiyon hızının, tekrarlanan donma ve çözölme döngülerine dirençli olan köpük beton üretiminde önemli değişkenler olduğunu da gözlemlemişlerdir. Öte yandan, donma-çözölme direncinin belirlenmesinde yoğunluk ve geçirgenliğin belirgin parametreler olmadığı görölmektedir.

Klorür İçeriği

Yapılan testler göstermiştir ki köpük betonun klorür girişine karşı performansı 25 MPa'lık basınç dayanımına sahip normal betonunki ile eşdeğerdir. Uygulanan bir akım metodu kullanılarak bulunan korozyon direnci, yoğunlukta bir azalma ile birlikte artar (Kearsley ve Booyens, 1998).

Karbonatlaşma

Jones ve McCarthy (2005b) köpüklü betonun karbonatlaşma direncini araştırarak köpük betonun karbon çeliği ile takviye edilip edilemeyeceğini ve açık havaya maruz kalmasının köpük beton üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Araştırmalarının sonuçları köpük betonun karbonasyona karşı direncinin zayıf olduğunu ve aynı özellikte olan normal betonun karbonasyonun daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır.

1.2.10 Lifli Köpük Beton

Geleneksel köpük beton (takviye içermeyen) genellikle gevrek olduğu için liflerin (genellikle cam, karbon, polimer kısa liflerin) ilavesi çatlama sonrası mukavemet tokluk kompozisyonu kazandırarak malzemenin gevrek yapısını hafifletmeye yarar (Zollo ve Hays 1998; Jones ve McCarthy, 2005a; Jones ve McCarthy, 2005b; Papayiannive Milud, 2005). Lifli çimentolu köpük beton, liflerden ve düşük yoğunluklu hücreli yapıdan önemli ölçüde etkilenir. Gözenek sayısı arttıkça düşük yoğunluklu köpük betonda daha iyi bir hava boşluğu ağı oluşturmaktadır.

Papayianni ve Milud (2005) %30'u yüksek kalsiyumlu uçucu kül ile değiştirilmiş normal portland çimentosu kullanılan köpük betonun basınç altında çatlamasını araştırmıştır. Karışımlarına çatlamayı azaltmak amacıyla polipropilen liflerini 1.3 kg/m³ oranında (%15 hacimce) eklediler. Ayrıca bu lifler köpük betonun yapısal elemanlarının basınç dayanımını ve kayma direncini arttırmak için de kullanılmıştır (Jones ve McCarthy, 2005a; 2005b). Bunula birlikte bu lifler köpük betonun akıcılığını ve kendinden sıkışma özelliklerini azaltmaktadır.

Fiberle güçlendirilmiş köpük beton, şok emici beton üretiminde de kullanılmaktadır. Böylece hem hücreli yapı hem de lif katkısı köpük betonun kompozit yükleme esnasında kırılmamasına katkı sağlar. Köpük betonun içindeki boşluklar darbe sırasında kademeli olarak çökerek darbeyi azaltır ve içindeki fiberler boşluklar arasında köprü kurarak darbenin emilimine katkıda bulunur (Weiss vd., 2005). Lifli köpük betonun bu özelliğinden dolayı darbe sadece lokal tek bir bölgeyle sınırlı kalmış olur. Zollo ve Hays (1998), yüksek enerjili seri yükleme oranları altında köpüklü betonları araştırmıştır. Bu yüklemeler fiberle güçlendirilmiş köpüklü betonda yalnızca bölgesel hasarlar üretti. Bu davranışın sebebinin

lifli malzemenin kırılma direncine sahip olmasından ve liflerin gerilme direncinden dolayı ortaya çıktığı sonucuna varmışlardır. Darbe tepkisi ayrıca hücresel betonun düşük yoğunluklu boşluk yapısı tarafından da önemli derecede etkilenmektedir.

1.2.11 Köpük Beton Uygulamaları

Köpük beton çok düşük yoğunluğu, düşük termal iletkenliği, üstün akışkanlık, kendi kendine yerleşme, normal betona nispeten kolay ve ucuz üretim gibi özelliklerinden dolayı kendine birçok uygulama alanı bulmuştur. Köpük beton uygulamaları bir yandan izolasyon ve boşlukları doldurmak için (küçük yoğunluklu köpük betonlarla) bir yandan da yapısal alanlarda (yüksek yoğunluklu köpük betonlarla) kullanılabilir (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

Kendiliğinden akabildiği için, boşluklar için ideal bir materyaldir. (şiddetli yağmura bağlı yollar altında oluşan boşluklarda, eski kanalizasyonlar, bodrumlar, kanallar, depolama tankları vb. gibi).

Köpük betonun diğer uygulamaları arasında hendek ve yol alt tabanı yenileme, termal yalıtım, ses yalıtımı, hafif ağırlıklı blok üretimi ve ön dökümlü panel üretimi, yangın izolasyonu, zemin stabilizasyonu, hava alanları ve düzenli trafikte kullanılmak için üretilen şok emici bariyerler yer almaktadır.

Köpük betonun kullanımı Kuzey Amerika, Kanada ve Meksika’da iyice yaygınlaşmıştır. Bu beton türü dünyanın diğer bölgelerinde de ve özellikle kötü hava koşullarına sahip, kasırgaların ve depremlerin çok olduğu bölgelerde popülerleşmiştir. Kuzey Amerika’da toplam talebin gerçek üretime eşit olduğu görülmektedir. Özellikle Kanada’da çimento bazlı köpük beton tünellerin anolarında derzlerde, akıcı dolgu gerektiren yerlerde ve diğer geoteknik uygulamalarda kullanılmaktadır. Fakat son 5 yılda köpük betonun kullanımında inanılmaz ölçüde bir ilgi ve genişleme kaydedilmiştir. Artan bu ilginin nedeni diğer hafif yapı malzemelerinin ve özellikle ahşabın maliyetinin önemli ölçüde artmış olması ve ormancılık ve alçı ürünlerine bağlı çevresel sorunlardır. Ayrıca köpük beton üretiminin lehine olan bir durumda çimento üretiminin kolaylığı ve çevresel avantajlarıdır. Çimento bazlı köpük betonda çok geniş ölçekte çimentolaştırıcı katkıların kullanılabilmesi bu avantajın temel sebebidir (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

Avrupa’da 50 yıldan beridir yapıların üretimlerinde hücresel betonlar kullanılmaktadır. Fakat bu hususta Amerika ve Kanada son yıllarda Avrupa’yı yakalamıştır. Köpük beton, yolda donma genleşmesini önlemek için kullanılır. Sığ kazıkların donmasını önlemek, sığ temelde donmaya karşı, kazık başlıklar altındaki donmayı önlemek için de kullanılmaktadır. Dolgu olarak, döşeme altında döşeme boşluklarını doldurmada kullanılır. İngiltere’de köpük betonun yıllık pazar büyüklüğünün 250000-300000 m³ civarında olduğu tahmin edilmektedir (Beningfield vd., 2005; Jones ve McCarthy, 2005a). Kanada’da ise bu ürünün pazarı her geçen yıl artmaktadır ve yaklaşık olarak 50000 m³’dür.

Ortadoğu’da, köpük betonun üstün ısı yalıtımı ve hafif doğası, depremlerin olumsuz etkilerini azaltmaya uygun olarak görülüyor. Bu tür köpükler, taşınan yükün az olduğu yerlerde yol alt-tabanı olarak kullanılıyor. Köprü kenar ayaklarında kullanıldığında düşük yoğunluğu nedeniyle büyük yatay yüklerle yüklenmemektedir. Böylece duvarların kalınlığının ve temellerin boyutunun azaltılması ile maliyette önemli tasarruf sağlanabilmektedir.

1.2.12 Araştırma İhtiyaçları

1960’lar ve 1970’lerde geniş bir şekilde araştırılmış olmasına rağmen, çeşitli faktörler çimento esaslı köpük betonun bilim ve teknolojisinin yeni bir yaklaşıma ihtiyaç olduğunu ortaya koymuştur (Hoff, 2003). Bunların içinde; gelişmiş köpükleştirici madde, kimyasal ve mineral katkıları ve takviyeler, çimento esaslı ürünler ile ilgili çevre bilincinin geliştirilmesi, aşırı yükleme altında davranış, sıcaklık ve çevreyi ilgilendiren uygulamalar ve ağırlık mukavemetine karşı yüksek dayanıklılık gösteren yapı malzemeleri için devam eden arayış gösterilebilir.

Köpük beton takviye ve ilavelerin kullanımı yönünden potansiyele sahiptir ve bu potansiyeli birçok alanda yapılacak araştırmalar sonucu açığa çıkabilir. Köpük kararlılığını etkilemeyen veya karışımında segregasyona neden olmayan kimyasal katkıları geliştirmeye sürekli ihtiyaç vardır. Örneğin; süper akışkanlaştırıcılar hava boşluk yapısının korunmasına yardımcı olduğundan köpük betonun yoğunluğunu yükseltmeden hem mukavemetin hem de kırılma değerlerinin daha iyi hale getirilmesi için liflerin ve hafif dolgu maddelerinin ilave edilmesini kolaylaştıracaktır. Ayrıca hızlandırıcılar ve geciktiriciler gibi diğer kimyasal katkı maddeleri, daha düşük bir hidrasyon ısı ile daha büyük hacimde dökümlere izin

vermek için köpükleştirici maddelerle uyumlu hale getirilmelidir (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

Köpük betonun mühendislik özelliklerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ihtiyaç vardır. Özellikle elastisite modülü, poisson oranı ve sünme, yapısal tasarıma yardımcı olmak için karakterize edilmelidir.

Köpük betonun farklı yoğunluklar için termal genleşme katsayısı ve özgül ısı belirlenmelidir. Köpük betonun yangın direnci yüksek bir malzeme olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda aşırı rötre yapar ve bunun nedeni henüz bilinmemektedir. Bu davranışın altında yatan sebeplerin ve mekanizmanın anlaşılması için çeşitli araştırmalar yapılmalıdır (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

Günümüzde fiber takviyeli köpük betonun özellikleri hakkında hala çok az bilgiye sahibiz. Düşük yoğunluklu çimento esaslı sistemlerin gerinim duyarlılığı hakkında çok az şey bilinmektedir. Statik ve dinamik yükleme ve çeşitli çevresel koşullar altında çimento esaslı köpük betonların yapısal tepkisini tanımlamak için açıkça daha fazla araştırma gerekmektedir. Yüksek kullanım alanı ve birçok avantajlı yönlerinden dolayı köpük betonla ilgili daha fazla çalışma yapılmalı ve bilinmeyen yönleri açığa çıkarılmalıdır (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

1.3 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Çeşitli metal endüstrilerinin yan ürünü olarak elde edilen atık maddelere cüruf denilmektedir. Cürufların kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri metal endüstrisinin ana ürün tipine ve üretim yöntemine göre farklılık gösterebilmektedir. Nikel ve bakır gibi metallerin cürufları sadece puzolanik özelliğe sahip iken yüksek fırın cürufu bünyesindeki yüksek CaO'den dolayı kendi başına bağlayıcı özelliği bulunmaktadır.

Metal endüstrisinden elde edilen cüruflar içerisinde en önemli ve en çok kullanılan cüruf yüksek fırın cürufudur. Geleneksel yöntemle üretim yapan çelik endüstrisinde elde edilen cüruflar kristal yapılı olup yol malzemesi veya hafif beton agregası olarak kullanılabilir. Modern üretim yöntemleriyle çelik üretiminden elde edilen cüruflar

camsı yapıda olup puzolanik özellik gösterebilmektedir. Bu nedenle bunları çimentolu sistemlerde çimento yerine veya ikame olarak da kullanılabilme imkânı sağlamaktadır.

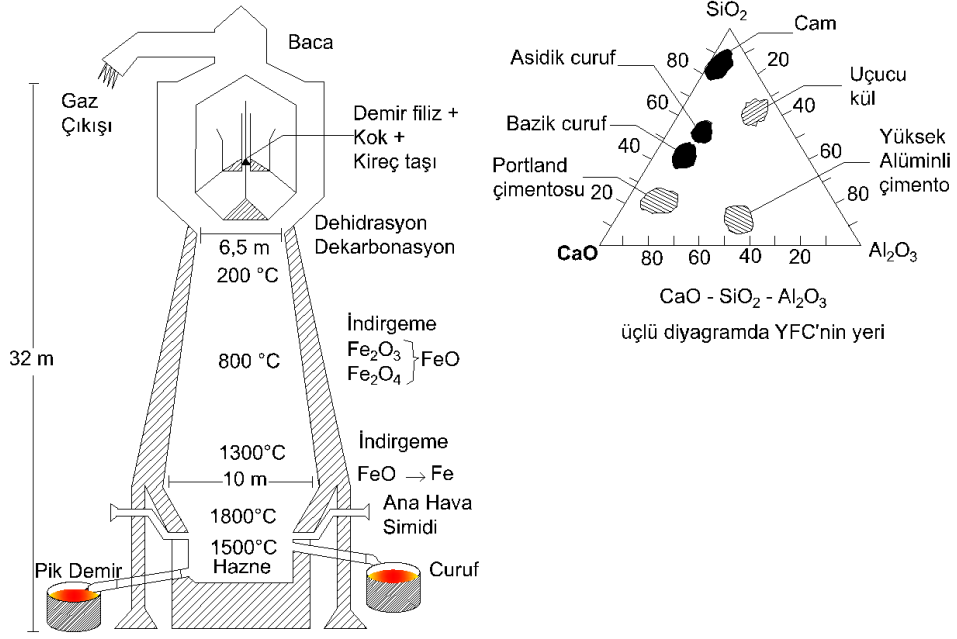
Yüksek fırın cürufunun su ve kireçle karıştırıldığı zaman bağlayıcı özellik gösterdiği ilk defa Emil Largens tarafından 1862 yılında gözlemlenmiştir. Daha sonra 1865 yılında ilk kez yüksek fırın cürufu-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Çimento üretiminde yüksek fırın cürufu kullanımı ise ilk defa 1883 yılında olmuştur. Portland yüksek fırın çimentosu üretimi ise ilk defa 1892 yılında Almanya’da Portland çimentosu klinkeri ile granüle yüksek fırın cürufunun birlikte öğütülmesi ile yapılmıştır. Günümüzde de granüle yüksek fırın cürufu Portland çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla cürufu çimento üretiminde kullanılmaktadır (Baradan vd., 2002).

1.3.1 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Elde Edilişi

Yüksek sıcaklık fırınlarında demir cevherinden demir elde edilirken demir cevheri yüksek sıcaklıklarda eritilmektedir. Yüksek fırınlarda en çok kullanılan yakıt türü kok kömürüdür. Yüksek fırınlarda demir cevherinin yabancı maddelerden arıtılması ve ergitilmeyi kolaylaştırmak amacıyla kireçtaşı kullanılmaktadır. Şekil 2’de gösterildiği gibi demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı sürekli olarak fırının üst tarafından verilmektedir.

Yüksek fırında 1500°C sıcaklıkta kok kömürünün karbonu ile demir cevherinin içindeki oksitler birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit gazları şeklinde fırını terk ederler. Fırının içinde ise eriyik durumdaki demir ile birlikte yine eriyik durumda kireç, kok kömürü külü, silis, alümin ve diğer maddelerden oluşan ve cüruf adı verilen malzeme kalır. Eriyik malzemeler fırının altında toplanır. Fırının alt tarafında toplanan eriyik durumdaki malzeme grubu içinde, yoğunluğu az olan cüruf üstte, daha ağır olan demir ise altta yer almaktadır. Daha sonra buradan eriyik demir ve cüruf ayrı ayrı çıkışlarla dışarı alınmaktadır.

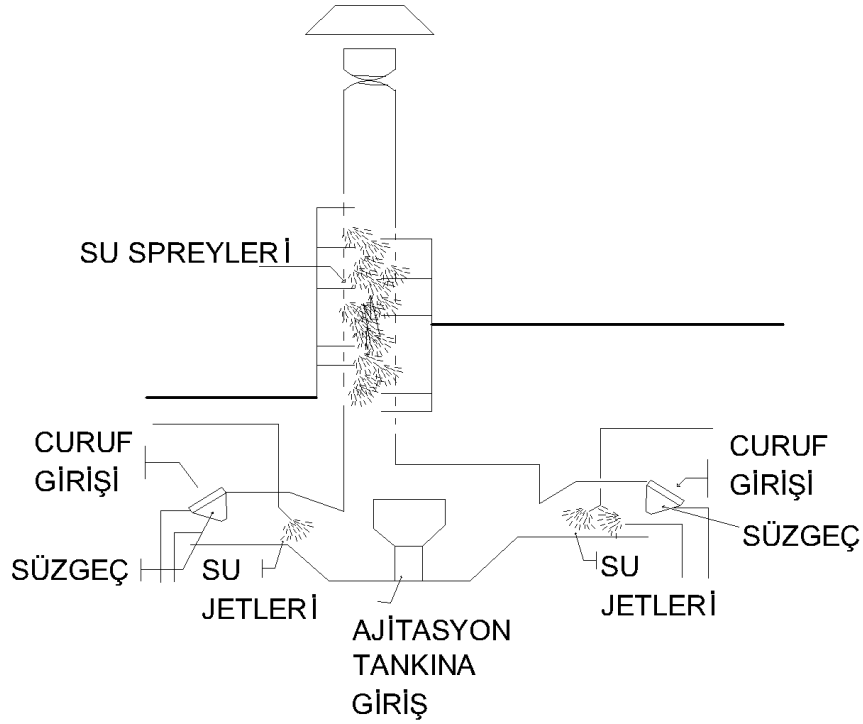
Yüksek fırından alınan cüruf 1500°C civarında, çok yüksek bir sıcaklıkta olduğundan puzolan olarak kullanılabilmesi için hızlı bir şekilde soğutulması gerekmektedir. Uygulanan soğutma yöntemi ve hızına bağlı olarak yüksek fırın cürufları oldukça değişik yapısal karakteristikler gösterebilmektedir (Baradan vd., 2002).



Şekil 2: Yüksek fırın şeması (Baradan vd., 2002).

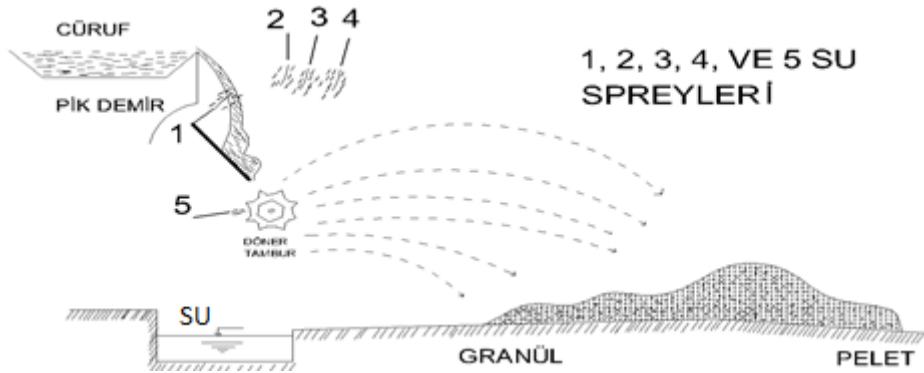
Atmosfer koşullarında oldukça yavaş soğutulan cüruflara havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu, su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulan cüruflara ise genleştirilmiş yüksek fırın cürufu adı verilir. Bol miktarda su ile çok hızlı bir şekilde soğutulan cüruflar kum taneleri gibi olup granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılmaktadır.

Yüksek fırın cüruflarının ani bir şekilde soğutulabilmeleri için iki farklı yöntem uygulanır. Şekil 3’de görülen granülasyon yönteminde soğutma işlemi çok fazla su ile (yaklaşık 100 m³/ton) gerçekleştirilebilir. Bu nedenle bu yöntemde cürufun içerdiği su miktarı yaklaşık olarak %30 kadardır. Fazla suyun cüruftan uzaklaştırılması amacıyla kurutucu değirmenlerden veya filtreli havuzlardan faydalanılır. Bu yöntemle elde edilen yüksek fırın cürufu özellik bakımından en iyi olanıdır. Ancak uygulanan yöntemin pahalı olması kullanımını sınırlamaktadır.



Şekil 3: GYFC'nun granülasyon yöntemi ile elde ediliş şeması (Baradan vd., 2002).

Şekil 3'da görülen ve peletleme adı verilen ikinci yöntem yeni olup, Kanada'da geliştirilmiştir ve daha yaygın kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntemde erimiş haldeki cüruf önce suyla soğutulmakta ve daha sonra Şekil 4'te gösterildiği gibi dakikada 300 devir yapan bir tambur ile havaya fırlatılmaktadır. Bu sayede 1 ton cüruf için yaklaşık 1 m³ su kullanılmakta ve cürufun içerdiği su miktarı %10'un altında olmaktadır. Peletleme yöntemi ile değişik boyutta malzemeler elde edilebilir. Büyük boyutlu olanlar (4-15 mm) çok gözenekli olup, kısmen kristal yapıya sahiptir. Bu nedenle ancak hafif beton agregası olarak kullanımı mümkündür. Camsı yapıya sahip olan daha küçük boyuttaki malzemeler (<4 mm) ise puzolan veya çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilir (Baradan vd., 2002).



Şekil 4: YFC'nin peletleme yöntemi ile elde ediliş şeması (Baradan vd., 2002).

1.3.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri

Granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliklerin etkileyen en önemli faktörlerden biri kimyasal kompozisyonudur. Fakat gerçekleştirilen pek çok araştırmaya rağmen puzolanik özellikler ile kimyasal yapı arasında kesin ve basit bir kural elde edilememiştir. Genel olarak alkalinitesi yüksek olan granüle yüksek fırın cürufun bağlayıcılığının da iyi olduğu kabul edilmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun puzolanik özelliği belli bir sınır değer CaO/SiO_2 oranının artışına bağlı olarak artma göstermektedir. CaO miktarının çok yüksek olması durumunda puzolanik özellikte azalma olmaktadır. Sabit bir CaO/SiO_2 oranı için Al_2O_3 miktarı artışı ise cürufun puzolanik aktivitesini arttırmaktadır. Cüruf içinde %10'a kadar MgO bulunmasının dayanıma olumsuz bir etkisi olmamaktadır. Ancak daha yüksek MgO miktarları zararlıdır. Granüle yüksek fırın cürufunun suyla tek başına reaksiyonu Portland çimentosunun hidratasyonu ile kıyaslandığında oldukça yavaş gelişmektedir (Baradan vd., 2002).

Ham demir üretiminde atık malzeme olarak oluşan YFC, yüksek fırınlarda ham demirden daha hafif olmasından dolayı ham demirin üzerinde kalır. Yüksek fırın cürufunu demir filizi gangı, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları meydana getirir. Yavaş soğutulduğunda YFC kristal bir yapı kazanır. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir. Beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan hızlı soğutma uygulaması sonucunda ise camsı yapıda YFC elde edilir. YFC'nun hidrolik bağlayıcı özellikte olması; cürufun kimyasal kompozisyonu, inceliği ve içerisindeki camsı yapı miktarına bağlıdır (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Cüruf, demir çelik fabrikalarında 1 ton çelik üretiminde yaklaşık 300 kg olarak ortaya çıkan yan üründür. Türkiye'de demir-çelik üretimi esnasında elde edilen atık YFC miktarı ise, yaklaşık olarak 690.000 ton/yıldır (Majumdar, 1992). Ülkemizde, oluşan cüruf tepeciklerini eritecek boyutlarda kullanım alanları yoktur. Karayolu üst yapısında agrega olarak kullanılabilirliği hakkında yapılan çalışmalar oldukça olumlu sonuçlar vermiştir (İlcalı, 1998).

Demir çelik ve bazı metallerin üretiminde olduğu gibi, elde edilmek istenen esas ürünle birlikte atılmak üzere bazı yan ürünler de ortaya çıkmaktadır. Yan ürün veya atık olarak elde edilen, büyük miktarlara ulaşan bu malzemelerden kurtulabilmek için bunları depolamak

veya atmak, çoğu kez büyük güçlükler yaratmakta olup toplum ve çevre için yeni sorunların kaynağı olabilmektedir. Oysa atık olarak elde edilen bu ürünlerin malzeme özellikleri incelendiğinde bazılarının belirli miktarlarda da olsa inşaat sektöründe kullanılabileceği görülmektedir (Bilim, 2006).

1.4 Uçucu Kül

Uçucu küller, endüstride yakıt olarak kullanılmayan ve düşük kalorili kömürlerin, toz haline getirilerek, yakılması sonucu, bacadan çıkan gazlarla birlikte yukarıya sürüklenen çok ince kül parçacıklarıdır. Uçucu küller, bacanın üst kısmında elektrofiltre veya siklon adı verilen toz tutucularda elektrostatik tutucuların alt kısmında bunkerlerde biriktirilir ve periyodik olarak santral dışına alınırlar. Çok hafiftirler. Baca gazları ile sürüklenerek ve hava ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanırlar. Uçucu küller boyut olarak yaklaşık 1-100 µm arasında olup aglomera ve küresel tanecikler şeklinde bir yapıya sahiptir. Tuğla üretiminde kullanılan kiler SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O ve Na_2O den oluşmaktadır. Uçucu küllerde yapısal olarak aynı oksitleri içerdikleri için tuğla üretiminde kullanılabilmektedirler. Uçucu küllerin tuğlalarda kullanılması ile tuğlaların kuruma ve pişme esnasındaki küçülmeleri azalmaktadır. Aynı zamanda uçucu küllerin içerdikleri karbon sayesinde, tuğlaların pişirilmesinde enerji tasarrufu sağlamaktadır (Öztürk, 2001).

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacı ile kullanılan pulverize kömürden yanma sırasında baca gazları ile taşınan küller açığa çıkar. Uçucu küller, bu küllerin elektrostatik veya mekanik filtrelerde tutulması sonucu ortaya çıkan atık ürünlerdir. Bu atık ürünün silis ve alümin içermesi, bu malzemeyi inşaat sektöründe kullanabilir hale getirmiştir. Uçucu küllerin özellikleri ve bileşimleri üzerinde kömürün önemli etkisi vardır. Taş kömüründen elde edilen ve SiO_2 ağırlıklı olan ve bir miktar Al_2O_3 bulunduran ve CaO oranı çok düşük olan küllere silikoalüminöz adı verilir. Özellikle linyit kömürü yakılmasından oluşan uçucu küllere, bileşimlerine bağlı olarak silikokalsik veya sülfokalsik denir. Silikokalsiklerde SiO_2 oranı daha yüksek iken bu her iki tip külde de önemli miktarda CaO yer alır. Sülfokalsikler CaO ' e ilave olarak SiO_3 de içerirler. ASTM C 168 standardına göre uçucu külleri iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Bu sınıflamada $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \% 50$ olanlar C sınıfı olarak kabul edilmektedir (Erdoğan, 2003).

Uçucu küllerin inşaat sektöründe önemli uygulama alanları vardır. Çimentoya belli oranlarda katıldıkları gibi, çimentonun son üretim aşamasında klinkere katılabilir ya da çimentoya kullanım aşamasında belli oranlarda katkı maddesi olarak eklenebilir. Bunun yanında çimento özelliklerini iyileştirici yönde etkisi de vardır. Hidratasyon ısısının düşürülmesi, beton işlenebilirliğinin geliştirilmesi, alkali reaksiyonunun azaltılması gibi etkileri de vardır. Tüm bu kullanım şekillerinde kendisinin bir atık madde olması nedeniyle bertaraf edilmesi ve maliyetin düşmesine de önemli katkısı vardır. Bununla birlikte gaz betonu üretimi, kile katılarak ya da aktive edici maddelerle birlikte tuğla üretimi, hafif agrega üretimi, zemin stabilizasyonu, yol inşaatı, baraj inşaatında sıkıştırılmış beton çalışmalarında da kullanılmaktadır (Türker vd., 2004).

Ülkemizde yıllık yaklaşık olarak 18 milyon ton uçucu kül atık olarak çıkmaktadır. Çimento ve beton sektöründe uçucu kül değerlendirilmekle beraber çıkan atığı tamamıyla bertaraf etmek noktasında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle çimento ve beton teknolojisine ek olarak uçucu külü tüketecek yeni alanların araştırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ÖZETİ

Köpük beton, çimento, su ve agregaların (bazalt, dolomit, kalker, uçucu kül, ponza, perlit, bims, vb.) karışımından elde edilen ve bünyesinde %75-90 oranında birbirinden bağımsız kapalı hava boşlukları bulunan gözenekli beton olarak tanımlanır (ACI 523.2R-96, 1996; British Cement Association, 1994). Köpük betonlar, binaların iç ve dış duvarları ile zeminlerinde kullanılan geleneksel yapı elemanlarının (taş, tuğla, bims briket, tesviye betonu, vb.) yerine kullanılabilir. Ayrıca, köpük betonlar bünyesinde doğal agrega ve çimento dışında malzeme bulundurmadığından, insan sağlığına zararlı hiçbir yönü olmayan, oldukça hafif, ısı ve ses yalıtımı özelliğine sahip, yatırım ve üretim maliyetleri düşük, çevreci bir yapı ve yalıtım malzemesi olarak bilinmektedir.

Köpük betonlar oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler. Birim ağırlığı düşük olduğundan duvar blokları, asmolen, prekast panel, süs elemanları/panelleri, dekoratif plakalar, pencere söveleri, hazır konut elemanları, prefabrik yapı elemanları, donatılı veya donatısız hazır bahçe duvarları, park ve bahçe peyzaj elemanları ve şehir mobilyaları üretiminde kullanılırlar. Ayrıca, endüstriyel yapıların termik ve akustik yalıtımlarında, yangına maruz kalabilecek yerlerde, tünel, maden, kuyu ve benzeri boşlukların doldurulmasında, zeminlerin stabilizasyonunda, hava meydanları, liman, yol ve kaldırım tabanlarının yapımında, köprü ve viyadüklerde buzlanmayı önlemek amacıyla yol altı tesviye-yalıtkan dolgu betonu olarak kullanılmaktadır.

Köpük betonlar özellikler binalarda termal konfor için ısıtma ve soğutmaya harcanan enerjinin tasarrufunda önemli rol oynamaktadır. Bünyesinde bulunan yüksek miktardaki hava boşlukları sayesinde köpük beton çok iyi ısı yalıtım özelliği gösterir. Köpük betonların Isı iletim katsayıları düşük olduğundan enerji tüketimini büyük ölçüde azaltır. Isı iletim katsayısı birim ağırlığa bağlı olarak 0.060 ile 0.610 W/mK arasında değişebilmektedir. Köpük beton, ısı ve ses yalıtımı özelliği yanı sıra düşük birim ağırlıklarda (250-1800 kg/m³) üretilmekte ve hafifliğinden dolayı da binaların zati yükünü azaltarak yapının statik yapısını olumlu yönde etkilemektedir. Taşıyıcı sistem elemanlarının kesitlerinin ve yapıya etki eden deprem yükünün azalması sağladığından köpük betonlar yapı maliyetleri düşüren

bir yapı malzemesidir. Köpük betonlar, çimento esaslı olması ve bünyesindeki boşluklar sayesinde daha esnek bir yapıya sahiptir, ısı depolamaz, inorganik oluşundan dolayı yanmaz, zararlı veya zehirli maddeler, buhar veya duman çıkarmaz, ayrıca zamanla boyutlarında değişiklik olmaz. Bu nedenle, uygulama sonrasında rüzgâr, ısı farklılığı, rutubet, don vb. farklı tepkiler altında çatlama, büzülme ve kabarma yapmaz.

Köpük betonların ısı yalıtım özelliğinin yanı sıra ses geçirimsizliğinin de düşük olması da ayrıca köpük betonların önemli bir avantajıdır. Günümüzde, konutlarda ve endüstriyel yapılarda çevre kirliliği olan gürültüyü engelleyebilmek oldukça önemli bir husustur. Köpük betonlar, bünyesindeki özel hava boşlukları sayesinde çok iyi bir ses emme özeliğine sahiptirler. Genel olarak köpük betonlar, yapı mekânlarını kış mevsiminde sıcak, yaz mevsiminde ise serin tutarak yıllık enerji giderlerini ortalama %40 oranında düşürebilmektedir. Köpük beton, yeni ve teknolojik bir yapı malzemesi olduğundan Türkiye için stratejik bir öneme sahiptir ve özelliklerinden dolayı gelecek yılların ana yapı ve yalıtım malzemesidir.

Yapılarda ısı yalıtımı özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerji tasarrufu açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle yangın dayanımı, düşük maliyet ve kalıcılık gibi özelliklere sahip farklı hafif betonların üretimi ve bu şekilde enerji tasarrufu elde edilmesi çoğu araştırmacıyı bu konuda çalışmaya yöneltmiştir (Wei vd., 2013; Pacheco-Torgal, 2014; Zhang vd., 2014; Huang vd., 2015). Bu malzemelerin kullanım alanları poliüretan levhalar ve genişletilmiş polistiren köpükler gibi diğer boşluklu ısı yalıtım malzemelerine kıyasla sınırlıdır, ancak ısı yalıtım performansları bu malzemelerin boşluk oranlarının artırılması ile iyileştirilebilir (Ramamurthy vd., 2009). Hafif betonlar farklı metotlarla elde edilebilir. Bunlar: a) düşük yoğunluğa sahip agregaların betonda kullanılması ile elde edilen ve hafif agregalı beton olarak adlandırılan betonlar b) çimento hamuru, harç veya beton içerisinde hava boşlukları oluşturulmasıyla elde edilen ve gaz ve köpük beton olarak adlandırılan betonlardır. Bunlar içerisinde çimento şerbeti köpük enjekte edilmesiyle elde edilen köpük betonlar ısı yalıtım özellikleri diğer hafif betonlara kıyasla daha iyi olduğu bilinmektedir (Collishaw ve Evans, 1994; Powell ve Evans, 1995; Liu, 1997; Colombo vd., 1998; Tuck ve Evans 1999; Newman ve Choo, 2003; Ranito vd., 2005; Williams vd., 2008; Mohammed ve Hamad, 2014). Köpük betonlar yoğunluk ve boşluk yapısı açısından sağladıkları avantajlardan dolayı inşaat sektöründe kullanılmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2007; Ramamurthy vd., 2009; Wei vd., 2013)

Köpük betonlar yüksek dayanım/ağırlık ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Köpük betonların yapılarda kullanılması yapı ve yapı temelinin sabit yüklerinin azaltır, enerji tasarrufuna sağlar ve işçilik maliyetini düşürür. Ayrıca normal betonlara kıyasla yapı elemanlarının üretim ve nakliye maliyetlerini düşürür (Amran vd., 2015).

İnşaat sektöründe kullanılan tipik köpük betonların yoğunlukları olarak genel 400 kg/m³ ile 1200 kg/m³ arasında değişebilmektedir. Isıl iletkenlikleri 0.15 W/mK ile 0.45 W/mK arasında ve buna değerlere bağlı olarak basınç dayanımları ise 1,5 MPa ile 6,5 MPa arasında değişebilmektedir (Kearsley ve Wainwright, 2001b; Kearsley ve Wainwright, 2002b; Jones ve McCarthy, 2005b; Pan vd., 2007; Mydin ve Wang, 2012; Mohamad vd., 2013). Köpük betonlar köpük ajanı tarafından harç içerisinde sürüklenmiş rastgele hava boşluklu (yaklaşık olarak 0.1–1 mm arasında değişen) bir içyapıya sahiptirler (Nambiar ve Ramamurthy, 2007; Jitchaiyaphum vd., 2011; Othuman ve Wang, 2011). Köpük betonlar yüksek akıcılık, düşük çimento miktarı ve düşük agrega hacmi ile üretilebilme (Valore, 1954; Jones ve McCarthy, 2005b), ayrıca çok iyi ısı yalıtım özellikleri ile bilinirler (Richard vd., 1975). Bunların yanı sıra, köpük betonlar büyük boyutlarda yapı malzemeleri ve yapı elemanlarının üretimine imkân vermesinden dolayı ekonomik çözümler sunmaktadır (Kearsley, 1999b; Tikalsky vd., 2004; Uddin vd., 2006; Tarasov vd., 2010).

Çimento esaslı malzemelerde dayanım ve kalıcılık gibi özellikler boşluk ve geçirimsizliğe bağlı olduğundan boşluk yapısı çok önemli bir özellik olarak bilinmektedir (Othuman ve Wang, 2011). Buna karşılık, toplam hava boşluk miktarı dışında boşluk şekli, boyutu ve içyapı içerisindeki boşluk dağılımını da dayanım ve kalıcılık üzerinde etkilidir (Zhuhua vd., 2014). Bu durum özellikle köpük betonlar için büyük öneme sahiptir.

Zhuhua vd. (2014) bağlayıcı olarak portland çimentosu ve ultra ince yüksek fırın cürufu ile bazı kimyasal katkıları kullanılarak kuru birim ağırlıkları 150 kg/m³ ile 300 kg/m³ arasında değişen düşük yoğunluğa sahip köpük beton üretmişlerdir. Buna karşılık kararlı bir köpük beton üretimi için karışım oranlarının kontrol edilmesinin gerektiğini vurgulamışlardır. Ayrıca, akışkanlaştırıcı katkı ve ultra ince yüksek fırın cürufu kullanılarak köpük betonların dayanımlarının iyileştirilebileceğini ve çatlak kontrolünün ise polipropilen lifler kullanılarak yapılabileceğini belirtmişlerdir.

Kozlowski vd. (2015) köpük betonların kırılma enerjileri ve eğilmede çekme dayanımlarının araştırılması amacıyla çentikli ve çentiksiz kiriş numuneleri üzerinde deneyler yapmışlardır. Araştırma sonucuna bağlı olarak köpük betonların kırılma enerjileri ile eğilmede çekme dayanımlarının birim ağırlığın artması ile arttığını ifade etmişlerdir.

Sayadi vd. (2016) yaptıkları çalışmada köpük hacmi ve çimento miktarının köpük betonların mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Köpük betonların basınç dayanımının birim ağırlığın azalmasıyla belirgin şekilde azaldığını, bunun nedeninin ise yüksek boşluk oranı ve köpük hacmine bağlı olarak birim ağırlığın azalması olarak belirtmişlerdir. Köpük betonlarda birim ağırlığın 1200 kg/m^3 'ten 800 kg/m^3 'e düşmesi ile basınç dayanımında %90'a kadar azalma olabileceğini ifade etmişlerdir.

Hilal vd. (2015b) önceden oluşturulmuş bir köpük kullanılarak yapılan, tek tek veya birlikte kullanılan katkı maddeleri silis dumanı, uçucu kül, süper akışkanlaştırıcı kullanarak kuru birim ağırlıkları 1300 kg/m^3 , 1600 kg/m^3 ve 1900 kg/m^3 olan köpük betonlar üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda geleneksel karışımlara kıyasla katkıların (ayrı ayrı veya kombinasyon halinde) köpüklü betonun hem çimento macunu mikroyapısını hem de hava boşluğu yapısını geliştirmeye yardımcı olduğunu ortaya koymuşlardır. Süper akışkanlaştırıcının tek başına kullanıldığında boşluk yapısına en fazla katkıda bulunduğunu ve diğer katkılarla birlikte kullanıldığında boşluk yapısını (daha küçük boşlukları) geliştirdiğini, bununla birlikte hem çimento yapısına hem de köpük betonun dayanımına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir.

Chen ve Ma (2017) köpük içeriği ve silis dumanının kuru yoğunluk, 28 günlük basınç dayanımı, ısı iletkenlik, su mukavemeti, gözenek yapısı gibi fiziksel özelliklerin toprak bazlı köpük beton üzerinde büyük etkileri olduğunu ifade etmişlerdir. Köpüğün hacimsel oranın artmasıyla ısı iletkenlik, yoğunluk, su mukavemeti ve basınç dayanımının düştüğünü buna rağmen silis dumanının artırılmasıyla bu özelliklerin arttığını belirtmişlerdir. Suya dirençli hafif beton olarak yoğunluğu 800 kg/m^3 , basınç dayanımı 0.75 MPa ve ısı iletkenliği 0.16 W/mK olan %20 silis dumanından oluşan toprak bazlı köpük betonun kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Amran vd. (2015) kararlı bir köpük beton üretiminin köpük ajanının cinsine, üniform hava boşluğu oluşturmak için hazırlanacak olan köpük solüsyonu yöntemine, karışım oranlarının

doğru tasarımına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Yüksek kararlılığa sahip bir köpük betonu üretimi için kullanılacak köpük hacminin azaltılmasını ve hidrasyon ısının düşürülmesi amacıyla çimentonun bir kısmı ile uçucu kül ve silis dumanının yer değiştirilmesini ve üretimde hafif agregaların kullanılmasını önermişlerdir.

Niu vd. (2016) portland çimento tabanlı köpük betonun hava boşluğu yapısı, sertleşme özellikleri ve taze köpük betonun stabilitesini incelemiş ve sonuçta gözenekleri %88.5-%95.4, basınç dayanımı 0.12 MPa–0.75 MPa olan ve ısı iletkenliği 0.036 W/mK'den 0.063 W/mK'e kadar olan betonların önceden oluşturulmuş köpük ilavesiyle elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca bir hızlandırıcının ve düşük dozda bir süperakışkanlaştırıcının ilavesiyle taze köpük betonun çökmesinin engellendiğini ifade etmişlerdir.

Hilal vd. (2015a) köpük betonun sertleşmesinden sonra boşlukların oluşumunu anlamak için köpük betonun karışımlarının kabarcık boyut dağılımını incelerken; köpük ajanının karışıma eklenmeden önce köpüğün bitüm emülsiyonu ile işlenmesiyle yapısının net bir görüntüsünün optik bir mikroskop kullanılarak alınabileceğini ifade etmişlerdir. Bu tekniği kullanarak köpük kabarcıklarının köpüklü beton karışımlarındaki hava gözenekleri arasındaki büyüklük dağılımı arasında önemli bir fark bulunduğunu ortaya koymuşlardır.

Panesar (2013) köpük betonun mekanik özellikleri, betonun iletim özelliklerini ve ısı direncini geliştirdiğinden dolayı hafif yapısal uygulamalarda kullanılmak için iyi bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymuştur, ancak bunun kullanılan köpükleştirici maddenin türüne çok hassas bir şekilde bağlı olduğunu ifade etmiştir. Biri protein diğer ikisi sentetik tabanlı olmak üzere üç farklı köpük ajanı kullanmış ve sonuç olarak köpükleştirici madde türünün, termal direnç ve emilim katsayısı üzerinde gözle görülür bir etkiye sahip olduğunu, ancak mekanik özellikler üzerinde daha az etkili olduğunu belirtmiştir.

Ramamurthy ve Nambiar (2006) yaptıkları araştırmalarda köpük betondaki hava boşluğunun, hacminin, boyutunun ve dağılımının dayanım ve yoğunluk üzerinde etkisi olduğu sonucunu ortaya koymuştur. Dar boyutlu hava boşluğu dağılımlı karışımların daha yüksek mukavemete sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Daha yüksek köpük hacminde kabarcıkların birleşmesiyle daha büyük hava boşlukları meydana gelmiştir ve bunun da boşlukların geniş dağılımına ve mukavemetin düşük olmasına neden olduğunu ifade

etmişlerdir. Hava kabarcıklarının şekillerinin köpük betonun özellikleri üzerinde etkisi olmadığı ifade etmişlerdir.

Tikalsky vd. (2004) köpük betonun donma-çözülme direncini araştırılması için modifiye bir donma-çözülme testi prosedürü geliştirmişlerdir. Karışımlar üzerinde yaptıkları bu testler ve karşılaştırmalar sonucunda basınç dayanımının, başlangıç penetrasyon derinliğinin, emilim ve emilim hızının, köpük betonun donma ve çözülme döngülerine dirençli hale getirilmesinde önemli değişkenler olmasıyla birlikte yoğunluk ve geçirgenlik açısından önemli değişkenler olmadığını ifade etmişlerdir.

Abd vd. (2017) taze köpük betonun basınç dayanımı tahmini için destek vektör makinesi modelini geliştirmiş ve önermişlerdir. Aynı zamanda çok değişkenli doğrusal olmayan regresyon modelini de kullanmışlardır. Bu modellerin basınç dayanımının iyi tahmin edilmesini sağladığını ve doğrusal çok değişkenli regresyona göre kullanılan verilerle daha iyi bağıntılar ortaya çıkardığını vurgulamışlardır.

Chen ve Ma (2017) magnezyum fosfat çimento bazlı ve köpük ajanı olarak sodyum bikarbonat kullanılarak hazırlanan yüksek erken dayanım özellikli köpük beton üretmişlerdir. Köpük betonun kuru yoğunluğunun, basınç dayanımının, yarma çekme dayanımının, ısı yalıtkanlığının ve su mukavemetinin sodyum bikarbonat içeriğinin artırılmasıyla düştüğünü gözlemlemişlerdir. Magnezyum fosfat çimento tabanlı köpük betonun 3 saatlik basınç dayanımının 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %70 i olduğuna dikkat çekmişlerdir. %10'u uçucu kül olan magnezyum fosfat çimento tabanlı köpük betonun 28 günlük basınç mukavemeti 2.4 MPa ve termal iletkenliği 0.072 W/mK olarak ölçülmüş ve aynı kuru yoğunlukta Portland çimento bazlı köpük betonunkinden üstün olduğunu belirtmişlerdir.

Tan vd. (2017) yüksek sıcaklığın köpük betonun özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için 4 farklı yoğunlukta (300 kg/m^3 , 450 kg/m^3 , 600 kg/m^3 ve 800 kg/m^3) köpük beton serisi üzerinde ortam sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda (200°C , 400°C , 600°C) deneyler yapmışlardır. Yüksek yoğunluklu (800 kg/m^3 , 600 kg/m^3) köpük betonlarda çatlaklar meydana geldiğini ve daha düşük yoğunluklu köpük betonlarda gözenek bağlantıları ve yüzey çatlaklarının daha kolay meydana geldiğini belirtmişlerdir. Sıcaklığın yükselmesiyle

yoğunluk, basınç, dayanımı ve elastik modülün bütün numuneler için daha da düştüğünü ifade etmişlerdir.

Chen ve Ma (2016) köpük betonun su emilimini düşürmek için normal portland çimentosu kullanarak 550 kg/m^3 'lük düşük yoğunluklu, potasyum trimetilsilanolat, kalsiyum sitrit ve sloksan esaslı polimer içeren üç tip su geçirmez madde kullanarak köpük beton üretmişlerdir. 48 saatlik su emilimi ile kılcal geçirimsizlik incelenmiş ve su geçirmez içeriğinin artırılmasıyla kalıcı mukavemet katsayısının önemli ölçüde geliştiğini ifade etmişlerdir. %1 sloksan esaslı polimer kullanıldığında 28 günlük dayanım 1.77 MPa ve ısı iletkenliği 0.150 W/mK olan köpüklü betonun su emme ve kılcal geçirimsizlik değerini sırasıyla %2.5 ve 0.989 olarak gözlemlemişlerdir.

Kozlowski vd. (2015) köpük betonların kırılma enerjileri ve eğilmede çekme dayanımlarının araştırılması amacıyla çentikli ve çentiksiz kiriş numuneler üzerinde deneyler yapmışlardır. Araştırma sonuçlarına bağlı olarak köpük betonların kırılma enerjileri ile eğilmede çekme dayanımlarının birim ağırlığın artması ile arttığını ifade etmişlerdir.

Nambiar ve Ramamurthy (2006) uçucu külün köpük betonunun mukavemet ve yoğunluğuna göreceli etkisini uçucu kül içermeyen karışımlarla karşılaştırarak incelemişler ve ince agreganın uçucu kül ile değiştirilmesinin, köpük betonun yüksek yoğunluğa sahip yoğunluklarda daha fazla dayanım sağlamasına yardımcı olacağı sonucuna varılmışlardır.

Makul ve Sui-iam (2016) Portland çimentosunun ağırlıkça %0, %5, %10, %15 ve %20 oranında yakılmış şeker kamışı keki ile değiştirerek, 900 kg/m^3 , 1000 kg/m^3 ve 1100 kg/m^3 yoğunluklu köpük beton karışımları üretilip 0.5 su bağlayıcı madde oranı ile testler yapmışlardır. Yakılmış şeker kamışı keki yüzdesi çimento için %10 oranında kullanıldıkça fonksiyonel özellikler bakımından diğer karışımlardan daha yayılabilir özellikte olduğunu ifade etmiş ve yakılmış şeker kamışı kekinin hafif köpük beton üretiminde bir malzeme olarak kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Alengaram vd. (2016) petrol palmiyesi küllü köpüklü jeopolimer betonunun morfolojisi, kür süresince daha yoğun ve homojen bir jeopolimer ana yapısının olduğunu doğrulamış ve bunun da daha yüksek basınç direnci meydana getirdiğini ifade etmişlerdir. Ancak ara yüzey

geçiş bölgesinde mikro çatlakların yayılmasıyla beton bozunmasının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.

Vesova (2016) düşük modüllü sentetik elyaf takviyeli köpük beton üretmenin, dağılık donatının teknolojik rolü göz önüne alındığında mümkün olduğunu ortaya koymuştur. Dağılık donatının, yeni hazırlanan köpük beton karışımının taşıma kapasitesindeki artışı etkilediğini ve bunun da tahrip edici işlemlerin ortadan kaldırılmasıyla boyutsal olarak istikrarı arttırdığını ve kalıba döküldükten hemen sonra istikrar kazandığını ifade etmiştir. Sentetik liflerin infüzyonu sırasında %1 oranında artan plastik kuvvet oranının, ilk ana yapıya kıyasla 2-4 kat arttığını gözlemlenmiştir.

Sayadi vd. (2016) yaptıkları çalışmada köpük hacmi ve çimento miktarının köpük betonların mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkilediğini ifade etmişlerdir. Köpük betonların basınç dayanımının birim ağırlığın azalmasıyla belirgin bir şekilde azaldığını, bunun nedeninin ise yüksek boşluk oranı ve köpük hacmine bağlı olarak birim ağırlığın azalması olarak belirtmişlerdir. Köpük betonlarda birim ağırlığın 1200 kg/m^3 'ten 800 kg/m^3 düşürülmesi ile basınç dayanımında %90'a kadar azalma olabileceğini ifade etmişlerdir.

Amran vd. (2016) yaptıkları çalışmalarda prekast köpüklü beton sandviç panellerin deneysel ve analitik çalışmasının sonuçlarını incelemişlerdir. Eksenel yüklerin kapasitesi, yük-eğilme profilleri, yük gerinimi ilişkileri, narinlik oranı, yük deplasmanı, yük deformasyonu, çökme modları, kırılma şekilleri ve sabit eksensel yük artışları altındaki ilerlemeleri ve köpüklü betonun özelliklerini kaydederek bu deneysel sonuçları ve sonlu elemanlar analizini araştırmacılar tarafından geliştirilen diğer formüllere dayanılarak hesaplanan teorik değerlerle karşılatırmışlardır. Sandviç panellerin nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için bu deneylere dayalı bir formül önermişlerdir.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kullanılan malzemeler

3.1.1. Çimento

Deneylerde Bartın Sanko çimento fabrikasından temin edilen CEM II 42.5 R çimento kullanılmıştır. Kullanılan, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 4'te. Çimentonun özelliklerinin TS EN 197-1'e uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3: Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.

Fiziksel Test Sonuçları TS-EN 196-3,196-6			
		Standartlar	Sonuçlar
Özgül Ağırlık		g/cm ³	3,14
Hacim Genleşmesi		mm ≤ 10,0	1,0
Su / Çimento Oranı		%	29,20
Priz Süresi	Başlama	Dakika ≥ 60	165
	Bitiş	Dakika ≤ 60	240
İncelik	Blaine	cm ² /g	3367
	45µ Elek	%	4,9
	90 µ Elek	%	0,1
Basınç Dayanım Denemeleri TS EN 196-1			
1 Gün			-
2 Gün		Mpa ≥ 20	30,2
7 Gün		Mpa	41,8

Tablo 4: Çimentonun kimyasal analiz sonucu.

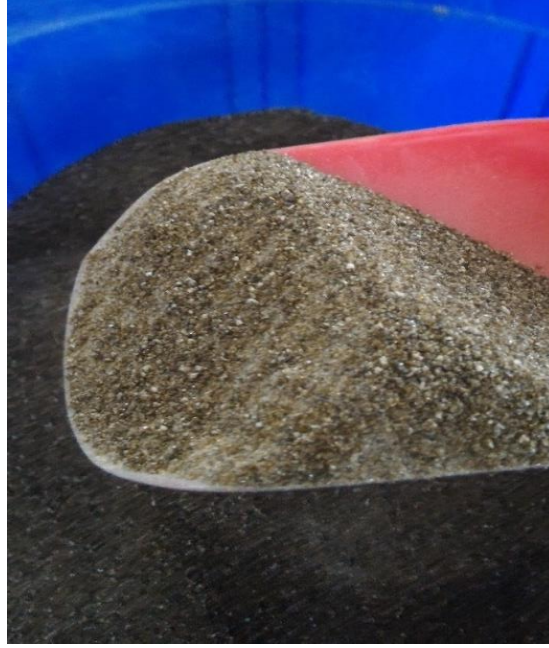
Kimyasal Analiz Sonuçları TS EN 196-2		
	Standartlar	% Sonuçlar
Toplam SiO ₂	-	19,28
Çözünmeyen Kalıntı	≤ 5,0	0,41
Çözünen SiO ₂		18,87
Al ₂ O ₃		5,45
Fe ₂ O ₃		2,79
CaO		64,41
MgO		2,07
SO ₃	≤ 4,0	2,76
Kızdırma Kaybı	≤ 5,0	2,50
Cl ⁻	≤ 0,1	0,017
Na ₂ O Eq.		1,18
Toplam		100
Tayin Edilmeyen		-
Serbest Kireç		-

3.1.2 Agregalar

Deneylerde doğal nehir kumu ve granüle yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu Kardemir A.Ş.’den elde edilmiştir. Agregaların elek analizi TS EN 3530 933-1’e göre yapılmıştır. Elek analizi sonuçları Tablo 5’te verilmiştir. Özgül ağırlık deneyleri TS EN 1097-6’ya göre, su emme deneyleri TS EN 13057’e göre yapılmıştır.

Tablo 5: Agregaların elek analizi ve fiziksel özellikleri.

Elek (mm)	Geçen (%)	
	Kum	GYFC
4	100	95.13
2	93.44	63.13
1	74.28	46.42
0.5	44.83	27.46
0.25	22.06	18.5
0.125	6.11	11
0.063	0.56	1
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.65	2.46
Su emme (%)	2.31	2.54



Şekil 5: Granüle yüksek fırın cürufu.

3.1.3 Köpük Ajanı

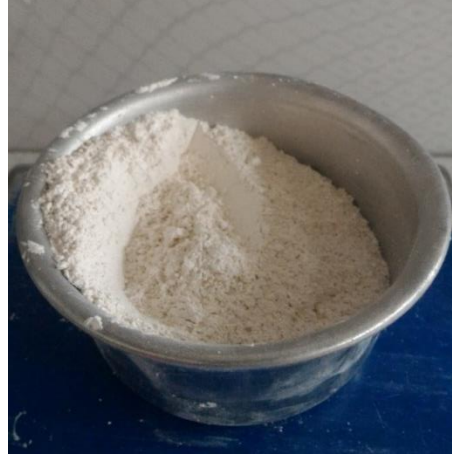
Köpük üretebilmek için organik reçine esaslı bir ajan kullanılmıştır. Köpük maddesi, Anti bakteriyel, enzim bazlı, aktif proteinlerden oluşmaktadır. Yoğunluğu 1.05 g/cm^3 'tür. Köpükler beton içerisinde birbirinden bağımsız kapalı hücreler oluşturur. Üretilmiş köpük birim hacminin $80\text{-}90 \text{ g/cm}^3$ olması idealdir. Genellikle 50 g suya 1 g köpük ajanı kullanılması durumunda 80 g/cm^3 'lük bir köpük yoğunluğu elde edilebilir.



Şekil 6: Kullanılan köpük ajanı.

3.1.4 Alçı

Köpük betonun karıştırıldığı andaki üniform yapısını bozmadan priz yapmasını sağlamak amacı ile bir miktar alçı kullanılmıştır. Kullanılan alçının donma başlangıç süresi 8-10 dakikadır.



Şekil 7: Kullanılan alçı.

3.1.5 Uçucu Kül

Uçucu kül Çatalağzı termik santralinden elde edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimi ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 6’de verilmiştir. Ayrıca uçucu külün XRD analizinde Şekil 20’de verilmiştir.

Tablo 6: Uçucu külün kimyasal ve bazı fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşen	Miktar (%)
SiO ₂	56.24
Al ₂ O ₃	27.75
Fe ₂ O ₃	5.72
S+A+F oranı	89.71
CaO	1.50
MgO	2.27
K ₂ O	4.02
Cl ⁻	0.010
Kızdırma Kaybı	1.16
Özgül Ağırlık	2.08 g/cm ³
Blaine	2234 cm ² /g
45 µ elek	% 40.6
90 µ elek	% 23.8

3.2 Karışım Oranları, Üretim ve Test

Karışım oranları Tablo 7’te verilmiştir. 300, 400 ve 500 kg/m³ çimento dozajı kullanılmıştır. Her bir çimento dozajında %100 doğal kumla kontrol numunesi ve %50 ve %100 doğal kumla GYFC yer değiştirilmiştir. Alçı miktarı ani prizi sağlamak amacı ile 5 kg/m³ olarak seçilmiştir. Uçucu kül miktarı kullanılan çimento miktarının %40’ı kadar kullanılmıştır. Köpük beton üretimi için Şekil 8’de gösterildiği gibi öncelikle bir kova içerisinde karıştırıcı mikser kullanılarak köpük ajanı ile su karıştırılarak köpük üretilmiştir. Daha sonra Şekil 9’da gösterildiği gibi çimento, agregalar, uçucu kül kuru olarak karıştırılmış, kuru karışımdan sonra su ilave edilerek harç elde edilmiştir (Şekil 10). Şekil 11’de gösterildiği gibi harç köpük içerisine boşaltılarak karıştırılmıştır. Son olarak da alçı karışıma ilave edilerek karışıma devam edilmiştir. Daha sonra Şekil 12’de gösterildiği gibi elde edilen köpük beton kalıplara doldurulmuştur. Herhangi bir vibrasyon uygulanmamıştır. Üretim işlemlerine ve üretilmiş numunelere ait resimler Şekil 13’te gösterilmiştir.

Tablo 7: Köpük beton karışım oranları.

Kod	Çimento (kg/m ³)	Toplam su (kg)	Alçı (kg)	Köpük ajanı (kg)	Uçucu kül (kg)	Kum (kg)	GYFC (kg)
M1	300	382	10	4	120	300	0
M2	400	382	10	4	160	215	0
M3	500	382	10	4	200	84	0
M4	300	382	10	4	120	150	127
M5	400	382	10	4	160	107	91
M6	500	382	10	4	200	42	36
M7	300	382	10	4	120	0	253
M8	400	382	10	4	160	0	182
M9	500	382	10	4	200	0	71



Şekil 8: Köpük üretimi, (a) köpük ajanının suya ilave edilmesi, (b) köpük ajanı ile suyun karıştırılması, (c) elde edilmiş köpük.



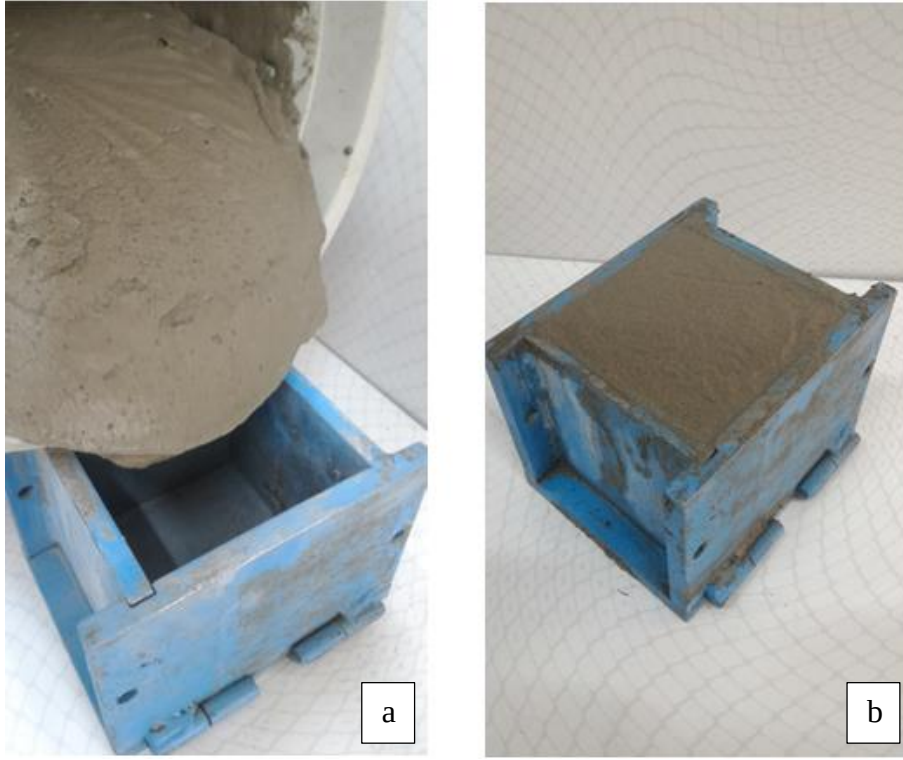
Şekil 9: Harç üretimi.



Şekil 10: Elde edilen harcın köpük eklenmeden görünüşü.



Şekil 11: Köpük beton, (a) harcın köpüğe ilave edilmesi, (b) köpük ile harcın karıştırılması, (c) elde edilmiş köpük beton.



Şekil 12: Köpük betonun kalıplanması, (a) köpük betonun kalıba dökülüşü, (b) kalıplanmış köpük beton.



Şekil 13: Prizini tamamlamış köpük beton.

3.3 Uygulanan Deneyler

Kullanılan çimentonun kimyasal analizine ek olarak fiziksel ve mekanik testleri de Sanko Bartın Çimento fabrikasında TS EN 196'ya göre yapılmıştır. Ayrıca uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun kimyasal analizleri yapılmıştır.

Kullanılan kum ve GYFC'nun elek analizleri yapılmıştır. Üretilen köpük betonların basınç dayanımları TS EN 12390-3 standardına göre 10×10×10 cm ebatlı küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Düzenek Şekil 14'de gösterilmiştir.



Şekil 14: Basınç dayanımı testi.

Üretilen köpük betonların ultrases geçiş süreleri TS EN 12504-4 standardına göre 10×10×10 cm ebatlı küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Düzenek Şekil 15'te gösterilmiştir.



Şekil 15: Ultrases geçiş süresi tayini.

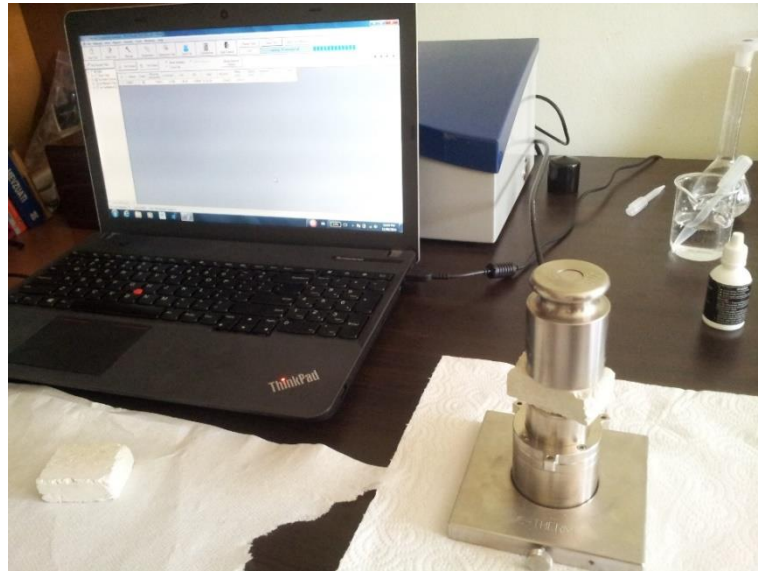
Üretilen köpük betonların poroziteleri Arşimet yöntemine göre 10×10×10 cm ebatlı küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Köpük beton numuneleri etüvde 24 saat kurutulup tartılmıştır (W1). Daha sonra numuneler 24 saat su içerisinde bekletilmiş ve bu süre sonunda yüzey kuru suya doygun hale getirilip tartılmıştır (W3). Beton numunelerin su içerisindeki asılı ağırlıkları (W2) ölçülmüştür. Üretilen köpük betonların birim hacim ağırlık, porozite ve su emme değerleri değerleri TS EN 772'ye göre aşağıdaki denklemler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Görünen porozite (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \right) * 100 \quad (5)$$

$$\text{Net birim hacim ağırlık (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W_1}{W_3 - W_2} \right) \quad (6)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3} \right) * 100 \quad (7)$$

Üretilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları TCi Thermal Conductivity Analyzer cihazı kullanılarak yapıldı. Cihaz değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Modified Transient Plane Source) metoduna göre ölçüm yapmaktadır. Isıl iletkenlik ölçüm düzeneği Şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16: Isıl iletkenlik katsayısı tayini.

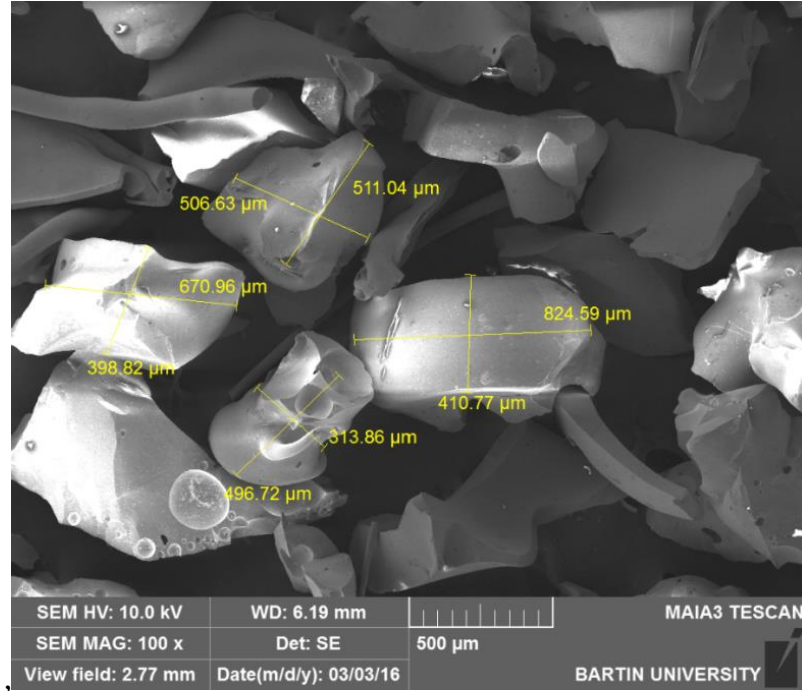
Köpük betonların iç yapıları Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan SEM mikroskobu ile incelenmiştir. İç yapıya ve gözenek dağılımına dair bilgiler toplanmıştır.

BÖLÜM 4

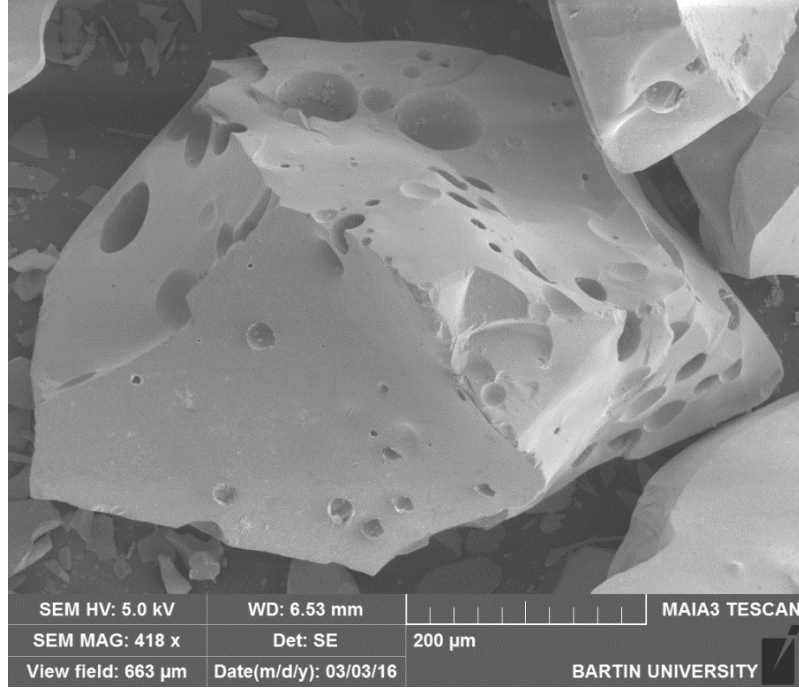
BULGULAR VE TARTIŞMA

Agregaların elek analiz sonuçları karşılaştırıldığında kum ve GYFC'nun değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir (Tablo 5). Bu durum GYFC'nun boyutsal olarak kuma alternatif kullanımında bir sakınca olmadığını göstermektedir. Özgül ağırlıkları ise birbirine çok yakındır. Su emme oranlarında ise çok büyük bir fark yoktur.

Şekil 18'de GYFC'nun SEM görüntüsü verilmektedir. Şekil 17'de GYFC'nun boyutsal dağılımı görülmektedir. Ayrıca GYFC'nun yüzey profilinin köşeli ve pürüzlü olduğu görülmektedir. GYFC'nun bu yapısı çimento hamuru ile aderansı artırması açısından önemlidir.



Şekil 17: GYFC'nun boyutsal dağılımı.



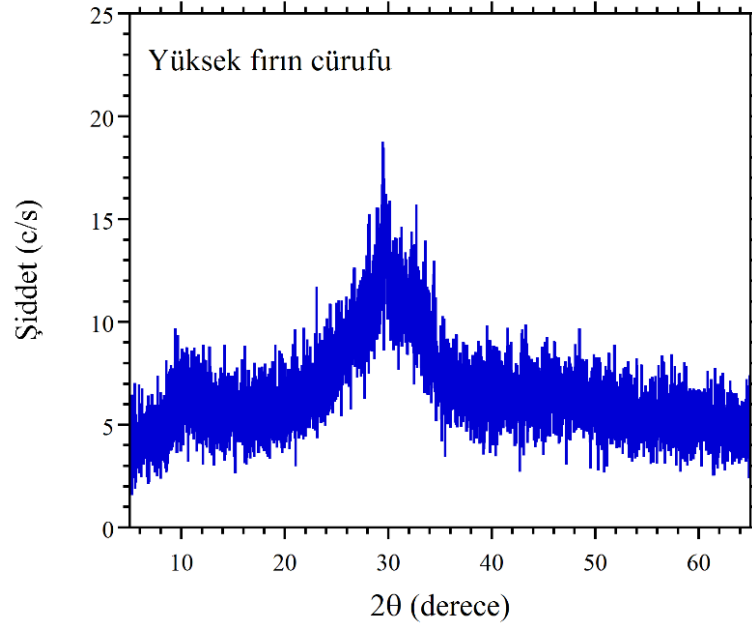
Şekil 18: Granüle yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü.

GYFC'nun kimyasal kompozisyonu Tablo 8'de verilmektedir. Buna göre, GYFC oksitli bileşen içeriğinin kalsiyum, silisyum, alüminyum ve magnezyumca zengin olduğu görülmektedir. Ayrıca, az miktarda mangan ve titanyum oksit bulunduğu görülmektedir.

Tablo 8: GYFC'nun kimyasal analiz sonuçları (ağırlıkça %).

Oksitler	YFC
Al_2O_3	10.2
SiO_2	38.14
Fe_2O_3	0.64
MgO	6.53
CaO	38.09
K_2O	0.86
Na_2O	0.71
TiO_2	1.38
MnO	1.91
CuO	0.52
P_2O_5	0.04
SO_3	0.54
Kızdırma kaybı	0.08

Şekil 19'da yüksek fırın cürufu (YFC) hammaddesinin XRD analizi verilmiştir. Buna göre, YFC hammaddesinin amorf (camsı) yapıya sahip olduğu 20° - 40° arasındaki tümsek eğriden görülmektedir.



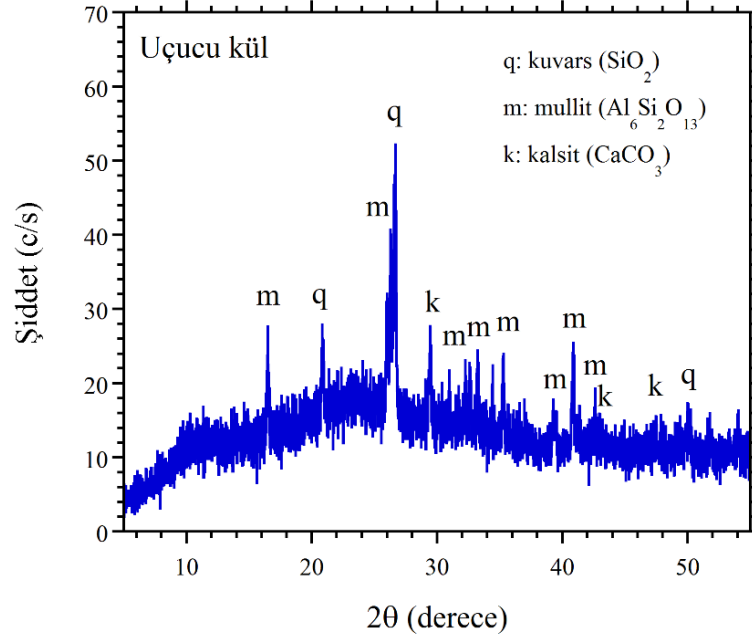
Şekil 19: GYFC'nun XRD analizi.

Uçucu külün kimyasal yapısı ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 6'da verilmektedir. Tablodan görüleceği üzere kullanılan uçucu külün SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 toplamı %89.71'dir. Buradan uçucu külün pozolanik özellik gösterebileceği anlaşılmaktadır. Özgül ağırlığının kısmen düşük olması üretilen betonun birim hacim ağırlığının azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

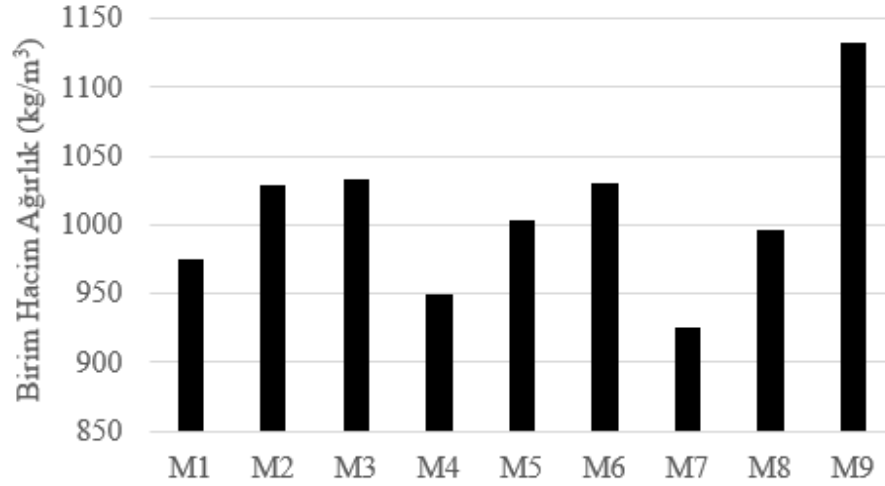
Tablo 6: Uçucu külün kimyasal ve bazı fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşen	Miktar (%)
SiO_2	56.24
Al_2O_3	27.75
Fe_2O_3	5.72
S+A+F oranı	89.71
CaO	1.50
MgO	2.27
Na_2O	0.55
K_2O	4.02
SO_3	0.11
Cl^-	0.010
Kızdırma Kaybı	1.16
Özgül Ağırlık	2.08 g/cm ³
Blaine	2234 cm ² /g
45 µ elek	% 40.6
90 µ elek	% 23.8

Şekil 20’de uçucu kül hammaddesinin XRD analizi verilmiştir. Buna göre, uçucu kül hammaddesinin kuvars, mullit ve kalsit kristal faz içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, kristalin fazların yanısıra amorf (camsı) yapıya da sahip olduğu 10°-40° arasındaki eğriden görülmektedir.



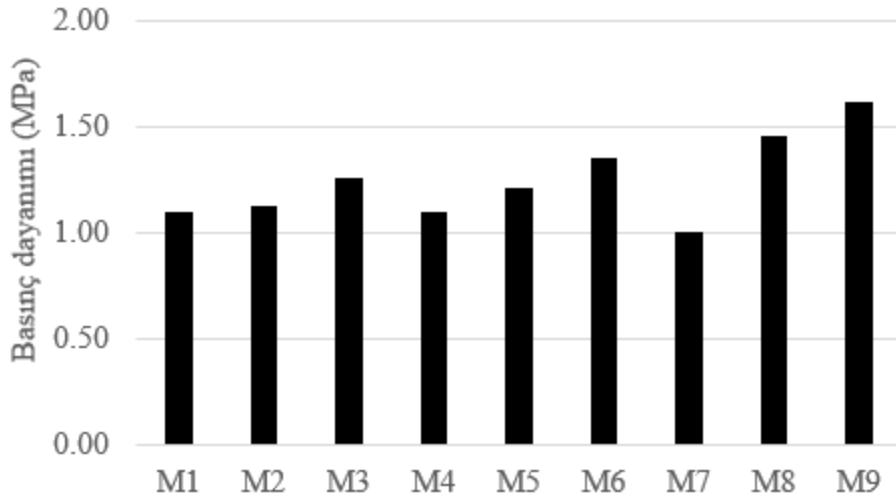
Şekil 20: Uçucu külün XRD analizi.



Şekil 21: Köpük betonların birim hacim ağırlıkları.

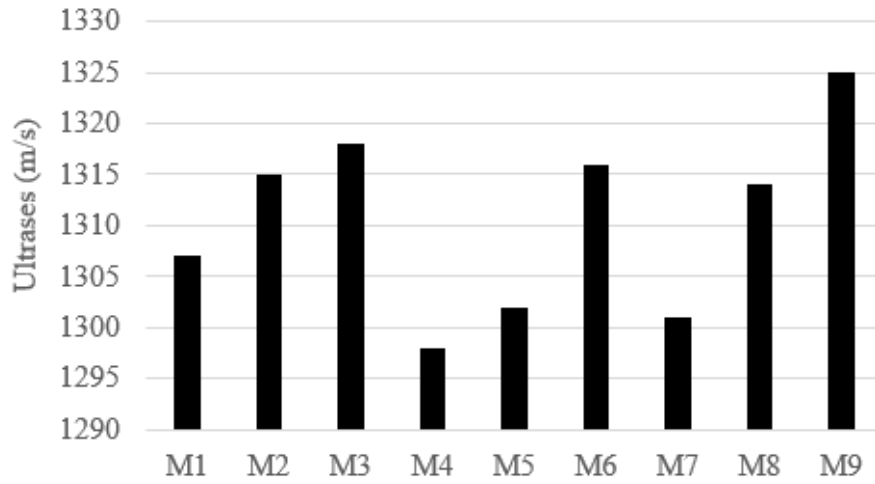
Köpük betonların kuru birim hacim ağırlıkları Şekil 21’de gösterilmektedir. Üretilen betonların ağırlıkları 926 kg/m^3 ile 1132 kg/m^3 aralığında değişim göstermektedir. GYFC’nun miktarı karışım içerisindeki miktarının artması tüm çimento dozajlarında

ağırlığın ortalama %5 civarında azalmasına neden olmaktadır. Bunun nedeni GYFC'nun özgül ağırlığının doğal kumun özgül ağırlığından azda olsa daha hafif olmasıdır. Birim hacim ağırlığın azaltılması yapı ağırlığının azaltılması ve taşıyıcı sistem boyutlarının küçültülmesi açısından önemlidir. Karışım içerisinde çimento dozajının artması birim hacim ağırlığı arttırmaktadır. Bunun nedeni çimentonun birim hacim ağırlığının yüksek olmasıdır. Betonların birim hacim ağırlıklarının düşük olması betonların yüksek poroziteye sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.



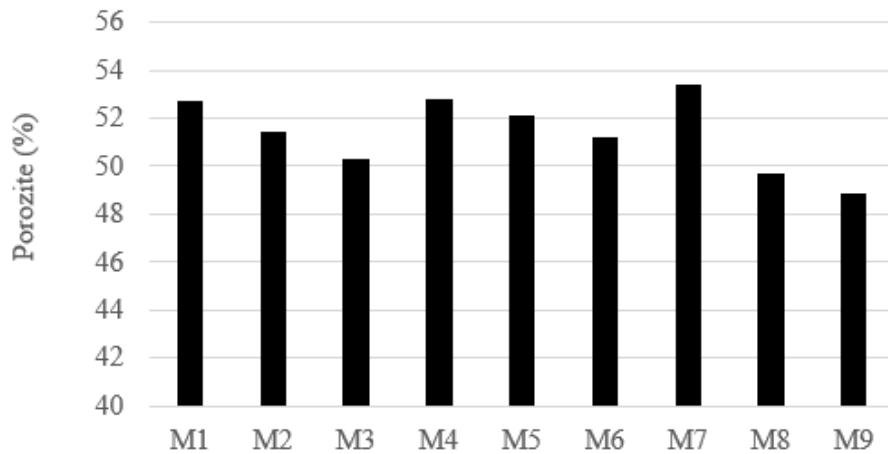
Şekil 22: Köpük betonların basınç dayanımları.

Üretilen köpük betonların basınç dayanımları Şekil 22’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere betonların basınç dayanımları 1 MPa ile 1.62 MPa aralığında değişmekte olduğu gözlemlenmiştir. Çimento miktarının artmasının basınç dayanımlarını arttırdığı gözlemlenmektedir. Ancak bu artış önemli bir artış değildir. Genellikle çimento miktarının artması basınç dayanımlarını önemli ölçüde artırma eğilimi göstermektedir. Ancak köpük beton da durum böyle olmamaktadır. Bunun sebebi betonun bünyesinde yer alan boşluklardır. Bu nedenle ekonomik açıdan bakıldığında köpük betonda çimento miktarını en az dozajda tutmak gerekmektedir. Dayanım arttırılmak istendiğinde çimento dozajını arttırmak yerine ilk önce boşluk oranının optimize edilmesi gerekmektedir. GYFC’nun kum ile yer değiştirilmesi sonucunda betonların basınç dayanımları çok azda olsa artış eğiliminde olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi GYFC’nun bünyesinde yer alan CaO’nun su ile reaksiyona girerek puzolanik özellik kazanmasıdır.



Şekil 23: Köpük betonların ultrases geçiş değerleri.

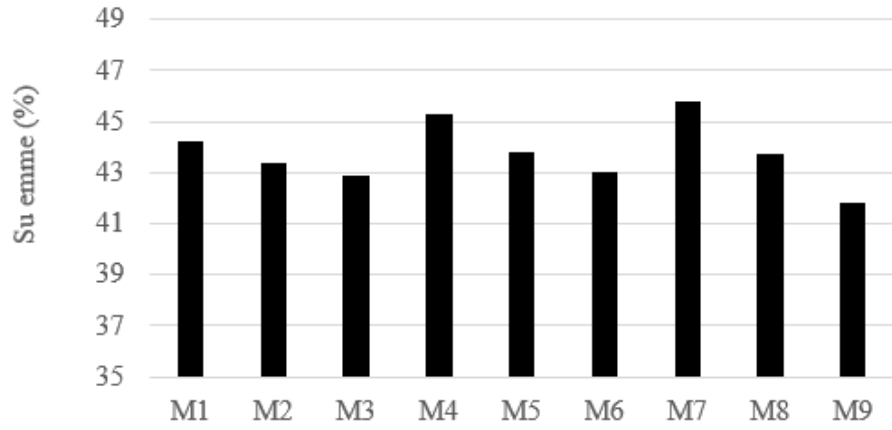
Ultrases geçiş süreleri Şekil 23'te gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere üretilen köpük betonların ultrases geçiş süreleri 1300 m/s civarındadır. Çimento dozajı ve GYFC'nun etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Betondaki ultrases dalgalarının hızı boşluk miktarı ile alakalıdır. Üretilen köpük betonlar oldukça yüksek boşluk yapısına sahip olduğu için ses dalgalarının beton içerisinden geçişi yavaşlamaktadır. Bu nedenle ultrases geçiş süresi betonun bünyesindeki boşluk yapısı hakkında bilgi verir. Bir betonarme betonunda ultrases geçiş değeri 3500 m/s'nin üzerindedir.



Şekil 24: Köpük betonların porozite değerleri.

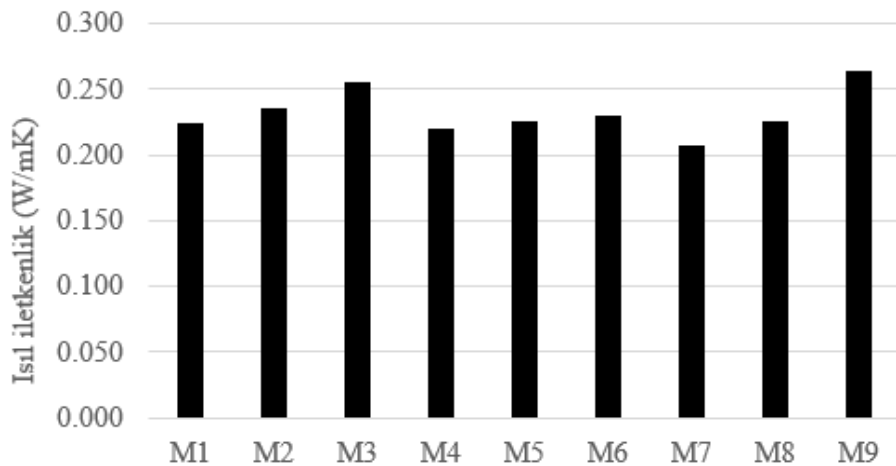
Üretilen köpük betonların porozite değerleri Şekil 24'te gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere betonların porozite değerleri oldukça yüksektir. Betonların porozite değerleri %48.9 ile %53.4 aralığında değişim göstermektedir. Porozitenin artması birim

hacim ağırlılığının azalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca porozitenin artması ısı performansının artmasına neden olmaktadır. GYFC'nun beton içerisinde kullanım oranının artması her çimento dozajında poroziteyi yaklaşık %2 civarında azaltmaktadır.



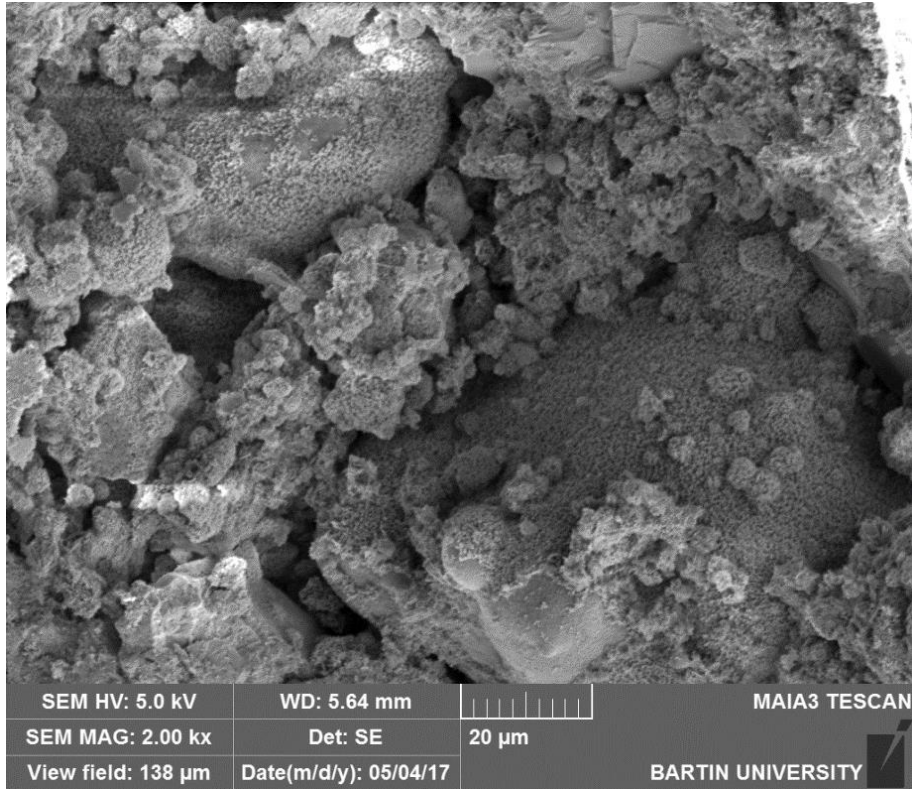
Şekil 25: Köpük betonların su emme değerleri.

Üretilen köpük betonların su emme değerleri Şekil 25’de gösterilmektedir. Betonların su emme kapasitelerinin %41’in üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Betonların su emme kapasiteleri oldukça yüksektir. Betonun su emme kabiliyeti boşluk yapısı ve oranı ile yakından ilgilidir. Yüksek poroziteye sahip betonların su emme oranı da yüksek olmaktadır. Yapısal amaçlı geleneksel betonun su emme değeri 6% ile 12% arasında değişmektedir. Üretilen köpük betonların poroziteleri de oldukça yüksek olduğundan dolayı su emme değerleri de oldukça yüksek değerlerdedir.

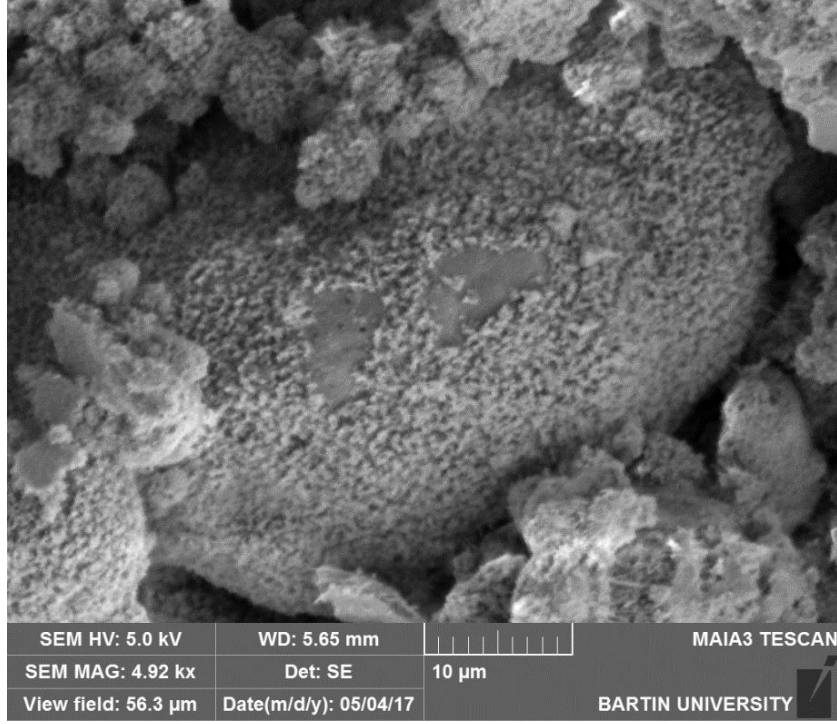


Şekil 26: Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları değişimi.

Üretilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayı değışimleri Şekil 26’da gösterilmektedir. Şekilden de görüleceğı üzere ısı iletkenlik katsayıların 0.208 W/mK ile 0.264 W/mK arasında değışim göstermektedir. Isı iletkenlik katsayısının azalması üretilen malzemenin ısı performansının yüksek olduğı anlamına gelmektedir. 0.2 W/mK’lık gibi bir ısı iletkenlik katsayısı ısı kaçışlarının daha az olacağı anlamına gelmektedir. Isı iletkenlik malzemenin porozitesi ile yakından ilgilidir. Porozitenin yüksek olması ısı iletkenlik katsayısının düşük değerler almasına neden olacaktır. Çimento dozajının ve GYFC’nun ısı iletkenliğe etkisi ihmal edilebilecek seviyededir.

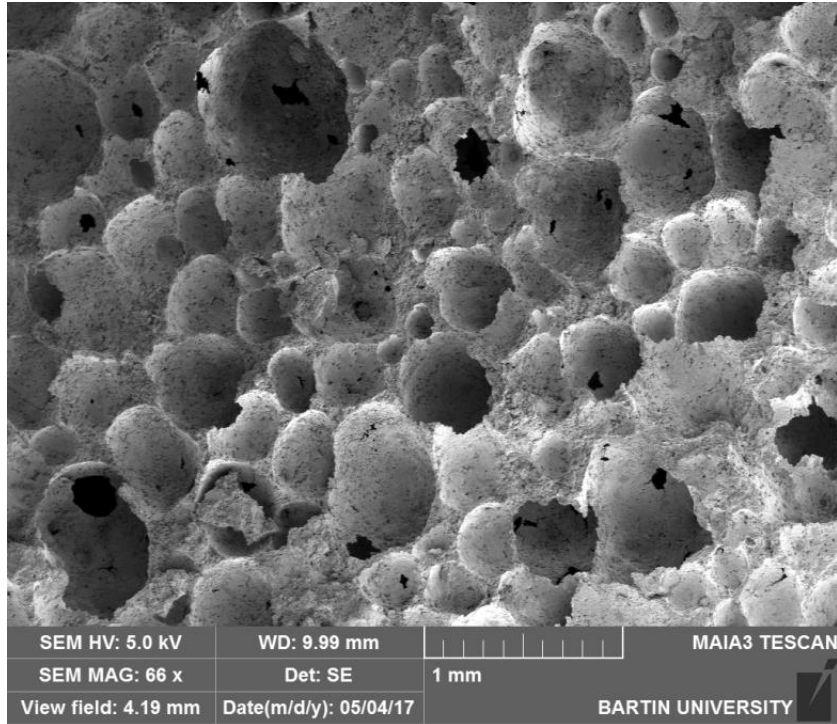


Şekil 27: Agregalar arasında köpüğün görünümü.



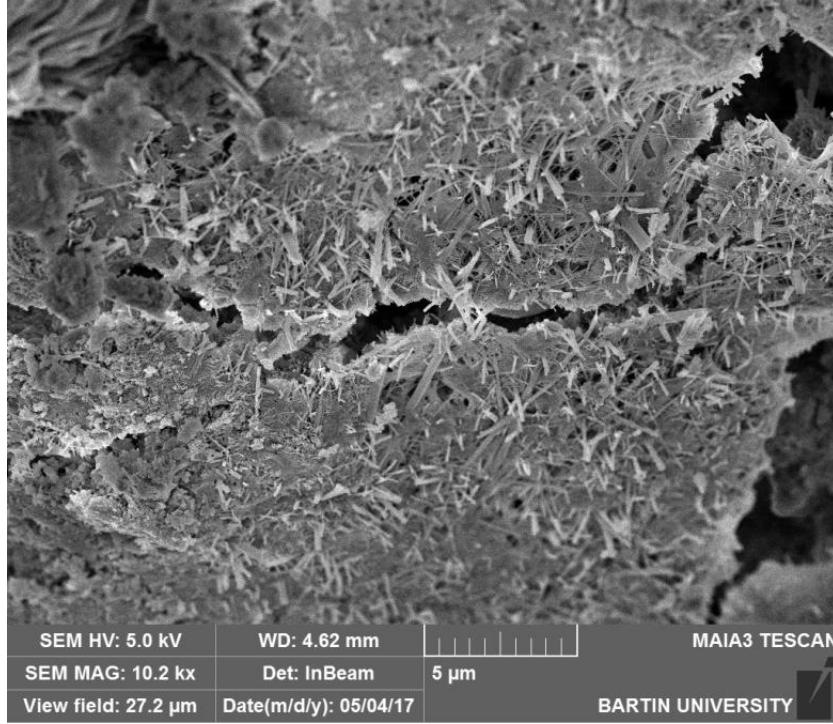
Şekil 28: Agrega yüzeylerinin köpük ile kaplanması.

Şekil 27-28’de köpük beton imalatında kullanılan agrega yüzeylerinin de daha küçük boyutlu köpük ile kaplandığı görülmektedir. Bu durum agrega yüzeyi ile bağlayıcı niteliğinde olan çimento ile aderansı azaltmaktadır.



Şekil 29: Poroz yapı.

Şekil 29’da üretilen köpük betonların bünyesindeki gözenek yapı gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere 1 mm’den daha büyük olmayan farklı boyutlarda gözenekler bünyede oluşmuştur. Bu durumun tüm bünyede homojen bir şekilde olduğu görülmektedir. Bu durum köpük beton üretiminde herhangi bir segregasyonun oluşmadığını göstermektedir. Gözenek yapının tüm bünyede homojen olarak dağılım göstermesi ısı yalıtım performansı açısından da oldukça büyük önem taşımaktadır.



Şekil 30: Çatlak görünümü.

Şekil 30’da köpük beton bünyesinde oluşan çatlak görünmektedir. Bu çatlaklar bütün bir yapı içerisinde olmamakla beraber yer almaktadır. Bu çatlaklar her ne kadar mikron mertebesinde de olsa dayanımın düşük çıkmasında etkili olmaktadır.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Bir endüstriyel atık olan GYFC'nun doğal kum ile yer değiştirilmesi ve çimento dozajının köpük beton özelliklerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen bulgulara göre;

- GYFC'nun tane dağılımının doğal kumun dağılımına yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sayede GYFC'nun bir ön işleme tabi tutulmadan doğrudan köpük beton içerisinde kullanılabileceği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bir maliyet artışı olmayacağı görülmektedir. Ayrıca GYFC'nun su emme ve özgül ağırlık değerleri de kumun değerleri ile oldukça yakın olduğu görülmüştür. GYFC'nun kalsiyum ve silis içerikli olduğu, kumun ise daha çok silis ve alümin içerikli olduğu görülmüştür.
- GYFC'nun köpük betonun BHA'nı azda olsa azaltma yönünde etki etmektedir. Çimento dozajının artması ise çimentonun yüksek özgül ağırlığından dolayı arttırmaktadır.
- Köpük betonların basınç dayanımları oldukça düşük değerlerdedir. GYFC'nun basınç dayanımına etkisi artma yönündedir. Bunun GYFC'nun puzolanik etkisinden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Çimento dozajı 300 kg/m^3 'ten 500 kg/m^3 'e yükseldiğinde basınç dayanımı artış göstermektedir. Ancak bu artış çok yüksek bir artış değildir. Basınç dayanımına etki eden faktörün beton bünyesindeki boşluk oranı ve boşluk yapısı olduğu düşünülmektedir.
- Köpük betonların ultrases geçiş sürelerine GYFC etkisi azalma yönünde iken çimento miktarının etkisi artış yönündedir. Ultrases geçiş süresi basınç dayanımında da olduğu gibi betonların içerisindeki boşluk oranı ve yapısı ile ilgilidir. Ultrases geçiş sürelerinin 1300 m/s civarında olması üretilen betonların oldukça fazla boşluk oranına sahip olduğunu göstermektedir.

- GYFC betonların porozitesine etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kum ve GYFC'nun tane dağılımı ve fiziksel yapılarının bir birine yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimento miktarının artmasının etkisi ise porozitenin azalması yönündedir. Betonların porozite değerleri yaklaşık %50 gibi yüksek bir değerde olduğu görülmektedir. Porozitenin yüksek olması BHA'ın ve basınç dayanımının düşük değerler almasının nedenidir.
- GYFC'nun köpük betonların su emme oranlarına etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin GYFC ve kullanılan kumun su emme değerlerinin birbirine yakın olması olduğu düşünülmektedir. Çimento miktarının artması su emme miktarının azaltma yönündedir. Bunun nedeni artan çimento miktarına paralel olarak porozite miktarı azalmaktadır. Porozitenin azalması su emme oranının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir.
- Köpük betonların en önemli üretim amaçlarından bir tanesi ısı yalıtımı sağlamasıdır. Üretilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları 0.02–0.025 W/mK bandında oldukça düşük değerlerdedir. GYFC'nun ısı iletkenlik katsayılarının değişimine etkisi yok denecek kadar azdır. Bunun nedeni ise GYFC'unun kum ile benzer fiziksel özellikler göstermesinden dolayı poroziteye etkisi azdır. Çimento miktarının artması ise poroziteyi azaltma yönündedir. Bu nedenle ısı iletkenlik katsayısı artan çimento miktarı ile artma göstermektedir. Isıl iletkenlik katsayısının düşük değerler alabilmesi için porozite değerinin yüksek olması gerekmektedir. Isıl iletkenlik katsayısının düşük olması daha az ısı kaybının olması anlamına gelmektedir. Piyasada yaygın olarak kullanılan pomza tabanlı bims blok ve kil tabanlı tuğlaların ısı iletkenlik katsayıları yaklaşık olarak 0.5 W/mK civarındadır. Üretilen köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları bunlarla karşılaştırıldığında oldukça performanslı bir ürün ortaya konulduğu anlaşılmaktadır.

- Üretilen köpük betonların SEM görüntülerine bakıldığından boşluk boyutlarının 1 mm'den küçük mertebelerde olduğu görülmektedir. Ayrıca bu boşluklar beton bünyesinde gayet homojen bir dağılım göstermektedir.

5.2 Öneriler

Bu çalışma kapsamında gelecek çalışmalara yön vermek amacı ile şunlar önerilebilir;

- Doğal kaynakların kullanımını azaltarak çevreye verilen zararın azaltılması, ayrıca atıkların doğada depolanarak çevresel kirliliğin ve bu kirliliğin meydana getirebileceği potansiyel sağlık sorunlarının önüne geçebilmek için atıkların yararlı ürünlere dönüştürülmesi yönündeki çalışmalar arttırılmalıdır. Bu sayede atıl bir vaziyette duran bir atık ekonomiye kazandırılarak katma değer üreten bir hale de dönüştürülmüş olacaktır.
- Köpük beton teknolojisinde GYFC kum yerine %100 oranda kullanılmalıdır. Ayrıca bir diğer endüstriyel atık olan uçucu külün köpük beton teknolojisinde daha da fazla oranda kullanılabilirliği açısından yeni çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.
- Köpük betonların basınç dayanımlarını arttırmak için çimento dozajı arttırmak yerine boşluk yapısı ve oranı ile optimizasyon yapmak gerekmektedir Ayrıca daha başka üretim yöntemleri de denenmelidir.
- Köpük beton tabanlı kaplama levhaları, tuğla formatları, bölme panelleri vb. gibi farklı yapı malzemelerinin üretilebilirliği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abd M.A., Abd M.S. (2017). Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM). *Case Studies in Construction Materials*, 6: 8-15.
- ACI 523.2R-96, (1996). Guide for precast cellular concrete floor, roof, and wall units. *ACI Committee 523*.
- ACI 523.1R-06, (2006). Guide for cast-in place low density cellular concrete. *ACI Committee 523*.
- Aldrige, D. (2005). Introduction to foamed concrete: What, Why, How? *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 1–14.
- Alengaram, U.J., Liu M.Y.J., Santhanam, M., Jumaat, M.Z., Mo, K.H. (2016). Microstructural investigations of palm oil fuel ash and fly ash based binders in lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 120: 112-122.
- Amran , Y.H., Nima Farzadnia, A.A., Abang, A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials* 101, 990–1000.
- Amran, M.H.Y., Ali, A.A.A., Rashid, S.M.R., Hejazi, F., Safiee, N.A. (2016). Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels. *Construction and Building Materials*, 107: 307-320.
- ASTM C796–04, (2004). Standard test method for foaming agents for use in producing cellular concrete using preformed foam. *ASTM International*.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun, K., Aydın, S., Yabancı, M.Y., Topal, A., Öztürk, A.T. (2002). *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, İzmir, 49-51 s.
- Bilim, C., (2006). Yüksek fırın cürufu katkısının çimento tabanlı malzemelerde kullanılabilirliği. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
- Bindiganavile, V. ve Hoseini, M. (2008). Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete. *Foamed Concrete*, University of Alberta, Canada, pp. 223-251.
- Beningfield, N., Gaimster, R., ve Griffin, P. (2005). Investigation into the air void characteristics of foamed concrete. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 51–60.
- British Cement Association, (1994). *Foamed concrete: Compositions and Properties*. Cambery, UK

- Chandra, S., Berntsson, L. (2002). Lightweight aggregate concrete: Science, technology and applications. *William Andrew Publishing, Norwich, New York, , USA*, ISBN: 0-8155-1486-7, pp.136-138.
- Chen, B. ve Ma C. (2016). Properties of foamed concrete containing water repellents. *Construction and Building Materials*, 123: 106-114.
- Chen, B. ve Ma, C., (2017). Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement. *Construction and Building Materials*, 137: 160-168.
- Collishaw, P.G. ve Evans, J.R.G. (1994). An assessment of expressions for calculating the apparent thermal conductivity of cellular materials. *Journal of Materials Science* 29: 2261–2273.
- Colombo, P., Griffoni, M., Modesti, M. (1998). Ceramic foams from a preceramic polymer and polyurethanes. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 13: 195–199.
- Cox, L.S. (2005). Major road and bridge projects with foam concrete. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 105–112.
- Cox, L.S. ve Van Dijk, S. (2002). Foam concrete: A different kind of mix. *Concrete (UK)*, Vol. 36, no. 2, February, pp. 54–55.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., Gül, R. (2001). Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research*, 31: 1627-1632.
- Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*, METU Press Publishing Company, Ankara.
- Goual, M.S., Bali, A., de Barquin, F., Dheilily R.M., ve Quéneudec, M., (2006). Isothermal moisture properties of clayey cellular concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1768–1776.
- Hamidah, M.S., Azmi, I., Ruslan, M.R.A., Kartini, K., ve Fadhil, N.M., (2005). Optimization of foamed concrete mix of different sand-cement ratio and curing conditions. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 37–44.
- Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. (2015a). On entrained pore size distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 75: 227-233.
- Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. (2015b). On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives. *Construction and Building Materials*, 85: 157-164.
- Hoff, G.C. (1972). Porosity-Strength considerations for cellular concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, pp. 91–100.

- Hoff, G.C. (2003). Discussion of development of deformable protective system for underground infrastructure using cellular Ggrouts, by Nehdi, Khan and Lo. *ACI Materials Journal*, Vol. 100, no. 4, pp. 350–351.
- Huang, Z., Zhang, T., Wen Z. (2015). Proportioning and characterization of Portland cementbased ultra-lightweight foam concretes. *Construction and Building Materials*, 79: 390–396.
- İlcalı, M. (1998). Karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Jitchaiyaphum, K., Sinsiri, T., Chindaprasirt P. (2011). Cellular lightweight concrete containing pozzolan materials. *Procedia Engineering* 14: 1157–64.
- Jones, M.R. ve Giannakou, A. (2004). Thermally insulating foundations and ground slabs using highly-foamed concrete. *Journal of ASTM International* 1(6) pp. 100–112.
- Jones, M.R. ve McCarthy A. (2005a). Behavior and assessment of foamed concrete for construction application. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 61–88.
- Jones, M.R. ve McCarthy A. (2005b). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research* 57(1), pp 21–31.
- Jones, M.R. ve McCarthy, A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 1032–1041.
- Kearsley, E.P. (1996). The use of foamcrete for affordable development in third world countries: Appropriate concrete technology. *Proceedings International Conference on Concrete in the Service of Mankind*, (Eds. RK Dhir & MJ McCarthy), London (UK), pp. 233–243.
- Kearsley, E.P. ve Booyens, P.J. (1998). Reinforced foamed concrete: Can it be durable? *Concrete Beton*, no. 91, November, pp. 5–9.
- Kearsley, E.P. (1999a). Just foamed concrete: An overview. *Proceedings: International Conference on Specialist Techniques and Materials for Concrete Construction*, (Eds. RK Dhir & NA Henderson) University of Dundee, Scotland, September 8–10, pp. 227–237.
- Kearsley, E. (1999b). The effect of high volume of ungraded fly ash on the properties of foamed concrete. In: *School of Civil Engineering*. Leeds: The University of Leeds; 1999

- Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J. (2001a). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 805–812.
- Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J. (2001b). The Effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 105–112.
- Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J. (2002a). Ash content for optimum strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 241–246.
- Kearsley, E.P. ve Wainwright, P.J. (2002b). The Effect of porosity on the strength of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 233–239.
- Kearsley, E.P. ve Mostert, H.F. (2005a). Designing mix composition of foamed concrete with fly ash contents. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 29–36.
- Kearsley, E.P. ve Mostert, H.F. (2005b). Opportunities for expanding the use of foamed concrete in the construction industry. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 143–154.
- Kearsley, E.P. ve Mostert, H.F. (2005c). The Use of foamed concrete in refractories. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 89–96.
- Krivenko, P.V., Kovalchuk, G.Y., Kovalchuk, O.Y. (2005). Heat resistant cellular concrete based on alkaline cements. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 97–104.
- Kozłowski, M., Kadela, M., Kukiela, A. (2015). Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams. *Procedia Engineering*, 108: 349–354.
- Lee, Y.L. ve Hung, Y.T. (2005). Exploitation of solid wastes in foamed concrete: Challenges ahead. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 15–22.
- Liu, D.M. (1997). Fabrication of hydroxyapatite ceramic with controlled porosity. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 8: 227–232.
- Majumdar, A. J. (1992). Properties of some blended high alumina cements. *Cement and Concrete Research*, 1101 – 1114.
- Makul, N. ve Sui-iam, G. (2016). Characteristic and utilization of sugarcane filter cake waste in the production of lightweight foamed concrete. *Journal of Cleaner Production*, 126: 118–133.

- Mohammed, J.H. ve Hamad, A.J. (2014). A classification of lightweight concrete: materials, properties and application review. *International Journal of Advanced Engineering, & Applications* 7: 52–57.
- Mohamad, I.N., Shamshinar, S., Roshazita Che, A. et al. (2013). Performance of lightweight foamed concrete with waste clay brick as coarse aggregate. *APCBEE Procedia*, 5: 497–501.
- Mydin M.A.O. ve Wang, Y.C. (2012). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, 26: 638–54.
- Nambiar, E.K.K. ve Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*, Vol. 28, pp. 475–480.
- Nambiar, E. ve Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(2):221–30.
- Newman, J. ve Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*, Butterworth-Heinemann, Burlington
- Niu Y., Lu Z., Jiang, J., Li, J., Zhang, Y. (2016). Study on the preparation and properties of high porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. *Materials and Design*, 92: 949-959.
- Othuman, M.A. ve Wang, Y.C. (2011). Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2):705–16.
- Öztürk, A. Ç. (2001). Tuğla üretiminde termik santral atığı puzolanik uçucu küllerin değerlendirilmesi üzerine bir araştırma. *Mimar Sinan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi*, S. 38-43, Edirne
- Pacheco-Torgal, F. (2014).Eco-efficient construction and building materials research under the EU Framework Programme Horizon 2020. *Construction and Building Materials*, 51: 151–162.
- Pan, Z., Fujiwara H., Wee, T. (2007). Preparation of high performance foamed concrete from cement, sand and mineral admixtures. *Journal of Wuhan University of Technology, Material Science Edition*, 22(2):295–8.
- Panesar, D.K., (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials*, 44: 575-584.
- Papayianni, I. ve Milud, I.A. (2005). Production of foamed concrete with high calcium fly ash. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 23–28.
- Powell, S.J., Evans, J.R.G. (1995). The structure of ceramic foams prepared from polyurethane ceramic suspensions. *Materials and Manufacturing Processes*,10: 757–771.

- Proshin, A.P., Beregovoi, V.A., Beregovoi, A.M., and Eremkin, A.I. (2005). Unautoclaved foam concrete and its construction adapted to regional conditions. *Proceedings: International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, University of Dundee, Scotland, July 5, pp. 113–120.
- Ramamurthy, K. ve Nambiar, E.K.K. (2006). Models relating mixture composition to the densit and strength of foam concrete using response surface methodology. *Cement & Concrete Composites*, 28: 752-760.
- Ramamurthy, K., Kunhanandan, N.E.K, Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement & Concrete Composites*, 31(6):388–96.
- Ranito, C.M.S., Oliveira, F.A.C., Borges, J.P. (2005). Hydroxyapatite foams for bone replacement. *Key Engineering Materials*, 284–286, 341–344.
- Richard, T.G., Dobogai, J., Gerhardt, T.D., Young, W.C. (1975). Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications? *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(2):500–503.
- Sayadi, A.A., Vilches, T.J., Neitzert, T.R., Clifton, G.C. (2016). Strength of bearing area and locking area of galvanized strips in foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 114: 56-65.
- Şimşek, O. (2004). *Beton ve beton teknolojisi*. Seçkin Yayınevi, Ankara, , s. 27-30.
- Tan, X., Chen, W., Wang, J., Yang, D., Qi, X., Ma, Y., Wang, X., Ma, S., Li C., (2017). Influence of high temperature on the residual physical and mechanical properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 135: 203-211.
- Tarasov, A.S., Kearsley, E.P., Kolomatskiy, A.S., Mostert, H.F. (2010). Heat evolution due to cement hydration in foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 62(12): 895–906.
- Tikal'sky, 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.
- Timbrell, J. (2007). Private Communication. *Light Concrete LLC*
- Tokay, M. ve Erdoğan, K., (1998). Türkiye termik santrallerinden elde edilen uçucu küllerin karakterizasyonu. *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*
- TS 2511, (1977). Taşıyıcı hafif beton karışım hesap esasları. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, , 13 s.
- TS EN 206-1, (2002). Beton- Bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002, 68 s.
- TS 1114 EN 13055-1, (2004). Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için. *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2004, 39 s.

- Tuck, C. ve Evans, J.R.G. (1999). Porous ceramics prepared from protein foams. *Journal of Materials Science Letters*, 18: 1003–1005.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaç, F. ve Yeğınobalı, A. (2004). Uçucu Küllerin Sınıflandırılması Ve Özellikleri; *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Arge/ YO3.O3*, Ankara
- Uddin, N., Fouad, F., Vaidya, U.K., Khotpal, A. Serrano-Perez, J.C. (2006). Structural characterization of hybrid fiber reinforced polymer (FRP)-autoclave aerated concrete (AAC) panels. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(9): 981–999.
- Valore, Jr. R.C. (1954). Cellular concretes Part 2 physical properties. *ACI Journal of Proceedings*, 50 (6).
- Vesova, L.M. (2016). Disperse reinforcing role in producing non-autoclaved cellular foam concrete. *Procedia Engineering*, 150: 1587-1590.
- Wee, T-H, Babu, D.S., Tamilselvan, T., Lim, H-S, (2006). Air-Void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *ACI Material Journal*, Vol. 103, no. 1, pp. 45–52.
- Wei, S., Yiqiang, C., Yunsheng, Z., Jones, M.R. (2013). Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 47:1278–1291.
- Weiss Jr., C.A., Tom, J.G., and Malone, P.G. (2005). Foamed fiber-reinforced concrete as a construction material for live-fire training ranges. *Proceedings (CD-ROM): ConMat '05 and Mindess Symposium*, Vancouver, August 2005.
- Williams, A.M., Garner, C.P., Binner, J.G.P. (2008). Measuring pore diameter distribution of gelcast ceramic foams from two-dimensional cross sections. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering*, 222: 2235–2247.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 56: 113–127.
- Zhihua, P., Hengzhi L., Weiqing, L. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, 72: 256–26.
- Zollo, R.F. ve Hays, C.D. (1998). Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete. *ACI Material Journal*, Vol. 95, no. 5, pp. 631–635.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı	:	Osman Hulusi ÖREN
Doğum Yeri ve Tarihi	:	ELAZIĞ / 12.06.1988
Eğitim Durumu		
Lisans Öğrenimi	:	Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans Öğrenimi	:	Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller	:	İngilizce (İyi)
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar	:	Gençel, O. ve Ören, O.H. (2017) Köpük Beton, Bartın Üniversitesi MÜTEB Dergisi.
İş Deneyimi		
Stajlar	:	06/2010 – 08/2010 İller Bankası 3. Bölge Müdürlüğü (İzmir) Şantiye Stajı : Konca İnşaat Bergama Su Arıtma Tesisi
		08/2010 – 09/2010 Estay Mimarlık Mühendislik (Malatya)
Çalıştığı Kurumlar	:	13.09.2012 - 20.04.2013 ÖZENSAN İNŞ. TAAH. ve TİC. A.Ş. (Bandırma Cezaevi İnşaatı / Ankara Altındağ Altın Kuleler) <u>Pozisyon:</u> Arazi Şefi (İnş. Müh.) 20.04.2013 - 28.12.2013 AÇILIM GRUP (Diyarbakır – Siverek – Şanlıurfa Karayolu) <u>Pozisyon:</u> Arazi ve Üst Yapı Şefi (İnş. Müh.) 10.02.2014 – 15.05.2015 ALPER YAPI DENETİM LTD. ŞTİ. <u>Pozisyon:</u> Kontrol Elemanı (İnş. Müh.) 01.07.2015 – (Çalışmaya devam ediyor) KORU YAPI DENETİM LTD. ŞTİ.
İletişim		
E-Posta Adresi	:	osmanhulusioren@gmail.com
Tarih	:	05/07/2017 (Tez sınav tarihi)