



**MERMER ATIKLARINDAN KÖPÜK BETON BLOK ÜRETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Volkan ATABEY**

**Danışman**

**Prof. Dr. İsmail DEMİR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Kasım 2018**

Bu tez çalışması 5140029 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MERMER ATIKLARINDAN KÖPÜK BETON BLOK ÜRETİMİ**

**Volkan ATABEY**

**Danışman**  
**Prof. Dr. İsmail DEMİR**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Kasım 2018**

## TEZ ONAY SAYFASI

Volkan ATABEY tarafından hazırlanan “Mermer Atıklarından Köpük Beton Blok Üretimi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30/11/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. İsmail DEMİR

**Başkan** : Dr. Öğr. Üyesi Hanifi TOKGÖZ  
Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

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

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

**İmza**

*H. Tokgöz*

*I. Demir*

*G. Görhan*

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

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

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

**beyan ederim.**

**30/11/2018**

**Volkan ATABEY**

**ÖZET**  
Yüksek Lisans Tezi

**MERMER ATIKLARINDAN KÖPÜK BETON BLOK ÜRETİMİ**

Volkan ATABEY  
Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
**Danışman:** Prof. Dr. İsmail DEMİR

Bu çalışmada mermer tozu, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar, köpük beton blokların üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. Ana hammadde mermer tozunun dolgu maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. CEM I 42,5 R tipi portland çimento bağlayıcı malzeme kapsamında tercih edilmiştir. Çimento bağlayıcının %0.5'i oranında polipropilen elyaf kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan mermer tozu ince tane boyutuna sahip olduğundan kırma ve öğütme işlemlerine gerek duyulmadan eleme işleminden sonra doğrudan kullanılabilme imkanına sahiptir.

Köpük betonların üretim aşamasında ön köpük yöntemi kullanılmıştır. Köpük makinesinde üretilen köpük yoğunluk ölçümlerinden sonra karışıma dahil edilmiştir. Tüm bileşenlerin karıştırıcıya katılmasından sonra mekanik yöntemlerle karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Taze beton homojen hale geldiğinde 15x15x15 cm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Plaka numunelerin ısı iletkenlik değerleri 0.14 – 0.20 W/mK arasında değişmektedir. Bu değerler ticari gaz betonlarla benzerlik göstermektedir. Rötre değerleri mermer tozu kullanılan örneklerde %0.09 gerçekleşirken, en büyük rötre değeri filler olarak tamamı uçucu kül kullanılan seride %0.11 değerinde belirlenmiştir. Örneklerin basınç dayanım değerleri 1.60 MPa – 4.35 MPa arasında değişkenlik göstermiştir.

**2018, x + 70 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Mermer Tozu, Köpük Beton, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu

**ABSTRACT**  
M.Sc. Thesis

FOAM CONCRETE MANUFACTURING FROM MARBLE WASTES

Volkan ATABEY

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

**Supervisor:** Prof. İsmail DEMİR

In this study, industrial waste such as marble powder, fly ash, and blast furnace slag were used as raw materials in manufacturing of foamed concrete blocks. Usability of marble powder as main filling raw material was investigated. CEM I 42,5 R type cement was selected as binding materials. Polypropylene fibre was used as 0.5% of cement binder. Since marble powder used in the experiments had fine grains, this material was directly used after screening process without crushing or grinding process.

Pre-foaming method was adopted during foamed concrete manufacturing stages. After density measurements of manufactured foam in foam machine, this foam was added to mixture. After adding all components to mixer, mixing process was completed with mechanical methods. When fresh concrete was homogenised, this concrete was moulded in 15x15x15 cm forms. Thermal conductivity values of plate samples varied between 0.14-0.20 W/mK. These data were similar to commercial aerated concrete. Dry loss value in samples with marble powder were as 0.09% while the highest shrinkage values was observed in complete fly ash filler series as 0.11%. Pressure strength level of obtained samples varied between 1.60 MPa-4.35 MPa.

**2018, x + 70 pages**

**Keywords:** Marble Powder, Foam Concrete, Fly Ash, Blast Furnace Slag

## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel alışmaların ynlendirilmesi, sonuların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolay tez danışmanım Sayın Prof. Dr. İsmail DEMİR'e, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 5140029 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolay aileme teşekkür ederim.

Volkan ATABEY  
AFYONKARAHİSAR, 2018

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ .....	x
1.GİRİŞ .....	1
2.LİTERATÜR BİLGİLERİ .....	2
2.1 Mermer Tozu .....	2
2.2 Uçucu Kül .....	6
2.3 Yüksek Fırın Cürufu .....	10
2.4 Köpük Beton .....	13
3.MALZEME ve METOT.....	22
3.1 Kullanılan Malzemeler .....	22
3.1.1 Mermer Tozu .....	22
3.1.2 Uçucu Kül.....	23
3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu.....	24
3.1.4 Çimento .....	25
3.1.5 Kireç .....	26
3.1.6 Alçı .....	26
3.1.7 Kalsit.....	27
3.1.8 Kimyasal Katkılar.....	28
3.2 Numune Üretim ve Deney Yöntemleri .....	31
3.2.1 Karışım Oranları ve Deney Numunelerinin Üretimi .....	31
3.2.2 Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	37
3.2.3 Köpük Beton Reolojisi Çalışmaları .....	38
3.2.4 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi .....	41
3.2.5 Köpük Beton Örneklerin Boy Değişim (Rötre) Değerlerinin Ölçülmesi .....	42
4.BULGULAR .....	43
4.1 Optimum köpük yoğunluğunun (gr/L) belirlenmesi.....	45
4.2 Su/Çimento (S/Ç), Su/Toz (S/T) Oranı ve Yapı Kimyasallarının Etkisi .....	45



4.3 Mineral malzemelerin taze beton ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi .....	47
4.4 Hemikarbonat faz oluşumuna Nano kalsit ilavesinin etkisi.....	47
4.5 Taze beton viskozite değerleri .....	53
4.6 Kür süresi ve koşullarının incelenmesi .....	55
4.7 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerleri.....	56
4.8 Köpük Beton Örneklerin Boy Değişim (Rötre) Değerleri.....	57
5.TARTIŞMA ve SONUÇ .....	59
6.KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	70



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

---

$Al_2O_3$	Aluminyum Oksit
$C_3A$	Trikalsiyum Aluminat
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum Hidroksit
$CaO$	Kalsiyum Oksit
$FeO$	Demir Oksit
$K_2O$	Potasyum Oksit
$MgO$	Magnezyum Oksit
$MgCO_3$	Magnezyum Karbonat
$Na_2O$	Sodyum Oksit
$SO_3$	Kükürt Trioksit
$SiO_2$	Silisyum Dioksit
$TiO_2$	Titanyum dioksit

### Kısaltmalar

---

BHA	Birim Hacim Ağırlık
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Curufu
KBHA	Kuru Birim Hacim Ağırlık
MT	Mermer Tozu
SK	Sönmemiş Kireç
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Curufu

---

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1 Afyon İncehisar Bölgesi mermer tozu tane boyutu dağılımı.....	22
Şekil 4.1 Seri 1 kodlu numunelerin XRD analizleri.....	50
Şekil 4.2 Seri 2 kodlu numunelerin XRD analizleri.....	50
Şekil 4.3 Seri 3 kodlu numunelerin XRD analizleri.....	51
Şekil 4.4 Dolgu olarak mermer tozu kullanılan 12 nolu serinin XRD grafiği. ....	51
Şekil 4.5 Dolgu olarak uçucu kül kullanılan 32 nolu serinin XRD grafiği. ....	52
Şekil 4.6 Su/bağlayıcı oranı ile taze harç yoğunluğuna bağlı viskozite değişimleri. ....	53
Şekil 4.7 Marsh konisi akış süreleri değişimleri. ....	54
Şekil 4.8 Üç farklı karışımda hazırlanan örneklerin boy değişim (rötre ) değerleri. ....	58

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 Ülkemizde bulunan mermerlerin genel kimyasal analiz değerleri.....	3
Çizelge 2.2 Çimento sınıflarının Yüksek fırın cürufu yüzdesi.....	12
Çizelge 3.1 Afyon İncehisar mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları (%). ....	22
Çizelge 3.2 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (%). ....	24
Çizelge 3.3 İskenderun Demir Çelik Fabrikası YFC kimyasal analiz sonuçları (%). ....	24
Çizelge 3.4 Klinkerin Kimyasal Özellikleri (%). ....	25
Çizelge 3.5 CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu Fiziksel Özellikleri. ....	25
Çizelge 3.6 CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu Mekanik Özellikleri. ....	25
Çizelge 3.7 Kirecin Kimyasal Özellikleri (%). ....	26
Çizelge 3.8 Kirecin fiziksel analizleri. ....	26
Çizelge 3.9 Alçı kimyasal analiz sonuçları (%). ....	26
Çizelge 3.10 Kartonpiyer alçısı fiziksel analizleri. ....	27
Çizelge 3.11 Kalsit malzemenin kimyasal özellikleri (%). ....	27
Çizelge 3.12 Sikament FFN katkı maddesi özellikleri. ....	28
Çizelge 3.13 SikaRapid-1 katkı maddesi özellikleri. ....	28
Çizelge 3.14 Polipropilen elyaf özellikleri. ....	30
Çizelge 3.15 1. grup numunelerin karışım oranları. ....	31
Çizelge 3.16 2. grup numunelerin karışım oranları. ....	32
Çizelge 3.17 3. grup numunelerin karışım oranları. ....	32
Çizelge 3.18 4. grup numunelerin karışım oranları. ....	33
Çizelge 3.19 5. grup numunelerin karışım oranları. ....	33
Çizelge 4.1 1. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri. .	43
Çizelge 4.2 2. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri. .	43
Çizelge 4.3 3. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri. .	44
Çizelge 4.4 4. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri. .	44
Çizelge 4.5 5. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri. .	44

<b>Çizelge 4.6</b> Referans bileşim ve farklı boyutta kalsit ilave edilen seriler. ....	48
<b>Çizelge 4.7</b> Referans bileşim ve farklı boyutta kalsit ilave edilen seriler. ....	49
<b>Çizelge 4.8</b> Plaka örneklerin (30x30x5cm) ısı iletkenlik değerleri.....	56
<b>Çizelge 4.9</b> Boy değişimi testi yürütülen karışımlar. ....	57
<b>Çizelge 4.10</b> Köpük betonun tipik özellikleri. ....	58



## RESİMLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Resim 3.1</b> Atık deposundan alınan mermer tozu. ....	23
<b>Resim 3.2</b> Kullanıma hazır mermer tozu. ....	23
<b>Resim 3.3</b> Seyitömer termik santrali uçucu külü SEM görüntüsü. ....	23
<b>Resim 3.4</b> Kimyasal katkıları. ....	29
<b>Resim 3.5</b> Köpük Makinesi ve Köpük Yoğunluğu Kontrolü. ....	29
<b>Resim 3.6</b> Polipropilen elyaf. ....	30
<b>Resim 3.7</b> Kullanılmak üzere üretilen köpük. ....	34
<b>Resim 3.8</b> Çalışmada kullanılan pan tipi mikser. ....	35
<b>Resim 3.9</b> Yoğunluk kontrolü. ....	35
<b>Resim 3.10</b> Köpük beton harcının kalıplara dökülmesi. ....	35
<b>Resim 3.11</b> Köpük beton harcının etüve hazır hali. ....	35
<b>Resim 3.12</b> Kalıpların etüve yerleştirilmesi. ....	36
<b>Resim 3.13</b> Örneklerin kalıptan çıkarılması. ....	36
<b>Resim 3.14</b> Örneklerle buhar kürü uygulanması. ....	36
<b>Resim 3.15</b> Testler için ayrılan örnekler. ....	37
<b>Resim 3.16</b> Örneklerin basınç presinde kırılması. ....	37
<b>Resim 3.17</b> Viskozite ölçüm cihazı. ....	39
<b>Resim 3.18</b> Viskozite disk (spindle). ....	40
<b>Resim 3.19</b> Viskozite ölçüm örneği. ....	40
<b>Resim 3.20</b> Deneyde kullanılan Marsh Konisi. ....	40
<b>Resim 3.21</b> Marsh Konisi ölçüleri. ....	40
<b>Resim 3.22</b> Deneylerde kullanılan Heat Flow Meter, (HFM-Fox 314) cihazı. ....	41
<b>Resim 3.23</b> Boy değişimi ölçümü için üretilen harç örnekleri ve ölçüm işlemi. ....	42
<b>Resim 4.1</b> Plaka numuneler (30x30x5cm). ....	56

## 1. GİRİŞ

Mermercilik sektörünün en önemli sorunlarından birisi mermerin kesilmesi sırasında kesme işlemini gerçekleştiren kesicilerin mermer bloğunu kesmesi esnasında oluşan küçük boyutlu mermer tozu atıklarıdır. Bu atıklar, testerelerin soğutulması ve oluşan bu tozların ıslatılması amacıyla verilen suya karışarak, su ile birlikte çöktürme kanallarından geçerek çöktürme havuzlarına taşınmaktadır. Oluşan bu mermer taneciklerini su çöktürme ve dinlendirme havuzlarında veya bazı modern tesislerde bulunan atık su tesislerinde de kek olarak alınmaktadır. Alınan bu atıklar boş arazilerde rastgele depolanmaktadır (Bilensoy 2010).

Köpük beton; taze halde düşük viskoziteye, düşük yoğunluğa, kullanım alanına bağlı olarak yeterli dayanıma ve düşük ısı iletkenlik özelliklerine sahiptir. Genel olarak kuru yoğunluğu  $400-1600 \text{ kg/m}^3$ , basınç dayanımı  $1-15 \text{ MPa}$  aralığındadır. Köpük beton kolayca pompalanabilir ve yerleştirilebilir. Sıkıştırma ve vibrasyon gerektirmez. Suya, dona ve yangına karşı yüksek bir dayanıma sahiptir (Davraz vd. 2015).

Köpük betonu oluşturan harç bileşenleri fonksiyonlarına göre belirli oranlarda kullanılır. Bunlar: Köpük ajanı, bağlayıcılar, su, agrega, mineral ve/veya puzolanik katkılar ve gerektiğinde kimyasal katkılardır. Bu tez çalışmasında köpük betonda dolgu malzemesi olarak mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozu Afyon İncehisar Bölgesinde bulunan mermer atık deposundan temin edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde; mermer tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve köpük beton hakkında daha önce yapılmış çalışmalarda elde edilen bilgilere yer verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, kullanılan malzemeler, numune üretimi ve yapılan test yöntemleri hakkında bilgiler sunulmuştur. Tezin dördüncü bölümünde, malzemelerden elde edilen bulgular verilerek yorumlar yapılmıştır. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Mermer Tozu

Kireç taşlarının ( $\text{CaCO}_3$ ) zamanla doğada meydana gelen ısı ve basınç (metamorfizma) etkisi ile kristalize olmuş bileşiminde en az %95  $\text{CaCO}_3$  bulunan, genellikle yoğunluğu 2550-2800  $\text{kg/m}^3$  arasında değişebilen, içerisinde az miktarda kuvars, grafit, hematit, limonit, pirit, mika, klorit gibi mermere değişik renkler ve damarlı bir görünüm kazandıran mineraller bulunur. Kimyasal bileşimlerinde büyük oranda kalsiyum karbonat, daha düşük oranlarda silisyum dioksit, ayrıca pigment olarak da değişik metal oksitleri bulunmaktadır (Kun 2000).

Mermer tozu  $900^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda kalsinasyona uğrar yani bünyedeki nemi ve karbondioksit gibi uçucu maddelerini bünyeden uzaklaştırır. Kalsiyum karbonat sönmemiş kirece dönüşür. Bu reaksiyon sonucu  $\text{CaO}$  genişir bünyedeki  $\text{CO}_2$  ile birlikte yaklaşık %54 ağırlık kaybına uğrar. Böylece mevcut kalan  $\text{CaO}$  (sönmemiş kireç) reaksiyonun devamında havanın neminden etkilenecek  $\text{Ca(OH)}_2$  (sönmüş kireç) açığa çıkar (Kılıç 2010).

Mermer, kireçtaşı ve dolomitik kireçtaşlarının sıcaklık etkisinde başkalaşıma uğrayarak yeniden kristalleşmesi ile oluşan metamorfik bir kayaç olup, kimyasal bileşiminde büyük oranda kalsiyum karbonat ve magnezyum karbonatın yanı sıra silisyum dioksit ile değişik metal oksitleri ve silikat mineralleri görülür (Şentürk vd. 1996).

Türkiye Maden İhracatçıları Birliği'nin yaptığı çalışmada yurdumuzdaki mermerlerin farklı renk ve dokudaki çeşitleri incelenmiş, kimyasal analiz sonuçlarından, mermerlerin  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  ve  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaCO}_3$  ve  $\text{MgCO}_3$  içerdiği görülmüştür. Bu değerlerin mermer yataklarındaki farklılıklara göre, maksimum ve minimum olduğu noktalar Çizelge 2.1'de verilmiştir (Kalay 2010).



**Çizelge 2.1** Ülkemizde bulunan mermerlerin genel kimyasal analiz değerleri.

<b>Oksitler</b>	<b>%min.-max.</b>
SiO <sub>2</sub>	0.010 – 28.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02 - 9.70
CaO	13.75 – 55.6
MgO	Eser – 26.25
CaCO <sub>3</sub>	88.16
MgCO <sub>3</sub>	6.23

Endüstriyel anlamda “mermer”; kesilip parlatılabilen her cins taş, mermer olarak kabul edilmektedir. Taşın cinsi ve içeriği ne olursa olsun büyük ebatta blok elde edilebilme, kesilme ve cilalanma gibi özellikler göstermesi, o taşın mermer olarak kabul edilmesi anlamına gelmektedir. Bunlardan granit, diyabaz, lösitli siyenit, fanolit ve serpantinler gibi magmadan türeyen kayalar da bu suretle mermer tanımının içine girmektedir (Ulusoy 2014).

Mermer sektörü, başta İtalya olmak üzere İspanya, Portekiz, Yunanistan, Brezilya, Güney Afrika, Çin ve daha bir çok ülkede ileri teknolojilerin kullanıldığı son derece önemli bir sektör durumundadır (Altınçiçek 2001).

Türkiye 5.2 milyar m<sup>3</sup> (13.9 milyar ton) toplam rezervi ile dünya mermer potansiyelinin yaklaşık %40'ına sahiptir. Yaklaşık 1.6 milyar ton civarındaki görünür rezervi ile dünya ihtiyacını bugünkü hızı ile 80 yıl karşılayacak potansiyele sahiptir. Mermer üretimimiz özellikle 1980'li yıllardan itibaren hızla artmıştır. Türkiye, mermer üretiminde dünyada 7. sırada, mermer ihracatında ise 8. sırada yer almaktadır. Mermercilik sektöründe 116'sı kamu ve 447'si özel olmak üzere toplam 563 blok mermer üreticisi bulunmaktadır. Ayrıca Türkiye'nin her yerine dağılmış binlerce blok mermer ve plaka hazırlama tesisi bulunmaktadır. Blok mermer üretimi esnasında yarı yarıya atık oluşmaktadır. Plaka kesimi esnasında ise en az %20 oranında atık oluşmaktadır. Batı Avrupa ve Amerika birleşik devletlerinde mermer atıklarını geri kazanım oranı %80'ler mertebesinde iken, ülkemizde bu oranın % 20 civarlarındadır (Öztürk 2009).

Türkiye’de yıllık 3 450 000 ton işlenen mermerden 980 000 ton mermer tozu ortaya çıktığı söylenmektedir. İtalya’daki bir çalışmada yılda yaklaşık  $3 \times 10^6$  ton malzeme çıkarılmakta olduğu fakat sadece %20-%25 inin yani yılda  $7.5 \times 10^5$  ton miktarda son ürün elde edilebildiği kaydedilmiştir. Esas miktarı atıkların oluşturduğu ve kırılmayla oluşan bu büyük miktarın kullanımının az olduğu belirtilmiştir. Bu yığın haldeki atıklara ‘ravanetti’ adını vermişlerdir (Rizzo and D’Agostino 2007).

Mermerlerin düzgün geometrik şekil alabilmesi için kesilmesi gerekmektedir. Kesme işlemi sonunda mermer tozu ortaya çıkmaktadır. Mermer tozu sulu kesim yapıldığından, başlangıçta ıslak olarak depo edilmekte veya doğrudan araziye bırakılmaktadır. Dolayısıyla çevre kirlenmesi söz konusudur. Hem mermerlerin çıkarılması hem de işlenmesi sırasında atık duruma gelen mermer tozlarının ülke ekonomisine kazandırılması ve çevre kirliliğinin önüne geçilmesi amacıyla çok değişik endüstriyel alanlarda kullanılması mümkün olmaktadır (Terzi ve Kardeşahin 2003).

Mermerlerin kesilmesi sırasında kullanılan elmas soketlerin aşınması nedeniyle mermer toz atıklarının içerisine Cu, Co, Sn gibi safsızlıklar karışmaktadır. Mermer tozlarının içerisine karışan bu safsızlıklar mermer tozunun endüstriyel olarak kullanım alanını sınırlandırmaktadır. Bu parçacıklar dışında, mermerin kimyasal bileşiminden gelen demiroksit vb. safsızlıklar da endüstriyel kullanım alanını sınırlayarak istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Falcon Gravite Konsantratör ile yapılan çalışmalarda istenmeyen parçacıkların mermer tozundan ayrılması belirgin bir ölçüde sağlanabileceği görülmüştür (Sayın ve Aksoy 2012).

Mermer işletmelerinde açığa çıkan ve değerlendirilemeyen mermer havuz çökelti malzemesi yapısal olarak filler malzemesine benzemektedir. Bu açıdan, havuz çökeltileri ve diğer kırıntı mermerlerin çeşitli sektörlerde değerlendirilmesi ekonomi ve çevresel kirliliği önlemesi açısından önemli yararlar sağlayacağı düşünülebilir. Mermer endüstrisini son yıllarda ilgilendiren en önemli konulardan birisi çevresel kirliliğe neden olan atıklardır (Albayrak 1985).

Ancak mermer işletmeciliğinde moloz toz ve paledyen ürünleri satılabilir ve değerlendirilebilir bir hammadde olmaları sebebiyle artık bir madde olup, üretim esnasında ortaya çıkan havuz çökeltileri de çeşitli işlemlerden sonra işe yarayan hem bir hammadde hem de ekonomik açıdan değeri olabilen bir malzeme olabilir (Albayrak 1985).

Mermer toz atıklarının temizlenmesinde, fabrikadan çıkan atık suyun, çöktürme işlemine tabi tutulmadan, doğrudan temizleme işlemine tabi tutulması uygundur. Böylelikle atık su arıtımı ve toz atıkların temizlenmesi işlemi bir arada yapılmış olur. Tane boyutu 5-100 µm arasında olan toz atıkların temizlenebilmesi için pratik olarak, eleme-sınıflandırma, flotasyon ve manyetik zenginleştirme yöntemleri uygundur. Bu yöntemlerden en ekonomik olanı flotasyondur. Mermer tozları, kalsit flotasyonuna tabi tutularak bünyesindeki demir oksitlerden ve silislerden temizlenebilmektedir. Tane boyutu 100 µm üzerindeki toz atıklarda aşındırıcı parçacık miktarı oldukça fazladır. Bu boyuttaki atıklar, doğrudan yoğunluğa göre ayırım işlemine tabi tutulurlar. Bu işlemde, aşındırıcı taneciklerin elde edilmesi mümkün olmaktadır (Tosun 1996).

Mermer tozu kullanım alanları; kâğıt üretimi, boya sanayi, plastik sanayi, seramik, cam, tarım sektörü, hayvan yemi üretimi, kireç ve çelik üretimi gibi çok çeşitli alanlara ham madde kaynağı olmaktadır. Fakat bu sektörlerde kullanılan mermer tozu miktarlarının çok az olması, atık ürünlerin önüne geçmekte etkin olmamaktadır. Ayrıca inşaat dışındaki diğer tüm sektörlerde fiziksel ve kimyasal yöntemlere başvurulduğu için maliyet yükselmektedir. Mermer tozu çimento esaslı ürünlerde kullanılmadan önce sadece kurutulacak ve az bir fiziksel kuvvetle toz haline getirilerek, inşaat sektöründe kullanımı daha ekonomik olmaktadır. Mimari amaçlı kullanılan karo gibi elemanlarda mermer tozu kullanımı oldukça olumlu sonuçlar vermiştir (Alyamaç ve İnce 2007).

Mermer toz atıkları sıva katkı malzemesi, çimento üretiminde katkı malzemesi, kireç üretiminde, kalsine dolomit üretiminde, refrakter malzeme olarak inşaat sanayinde çeşitli şekillerde kullanılmaktadır (Şenturk vd. 1996).

Mermer kökenli agregaların aşınma ve dane dayanımlarının düşük olmasının bilinmesine karşın belirli beton sınıflarında mermer kökenli agregalar kullanılabilir (Akbulut ve Gürer 2003).

Günümüzde, atık ve atık olarak ortaya çıkan malzemelerin yeniden kullanımı ve geri dönüşümü konusunda yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalarda atıklardan yeni ürünler elde edilmesi veya bunların katkı maddesi olarak kullanılması amaçlanmaktadır (Rizzo and D'Agostino 2007).

Atıkların yeniden kullanımı veya geri dönüşümü; sınırlı olan doğal kaynakların kullanımını azaltarak, doğanın tahrip edilmesini önlemekte, üretimde verimliliği artırmakta ve atık depolanması sonucu oluşacak çevre problemlerini en aza indirmektedir (Rizzo and D'Agostino 2007).

## **2.2 Uçucu Kül**

Uçucu kül, pulverize kömürün yanmaya yardımcı malzemeler ile birlikte veya tek başına yakılmasından elde edilen, puzzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ten meydana gelen, reaktif  $\text{SiO}_2$  muhtevası kütlece en az %25 olan, büyük ölçüde küresel ve camsı taneciklerin ince tozlarıdır (TS EN 450-1 2013).

Uçucu küllerin, boyutları genellikle  $0.5\mu\text{m}$  ile  $200\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Spesifik yüzeyleri  $1800\text{ cm}^2/\text{gr}$ – $5000\text{ cm}^2/\text{gr}$  arasında değişmekle birlikte, ortalama  $2800\text{ cm}^2/\text{gr}$ – $3800\text{ cm}^2/\text{gr}$  dolayındadır. Uçucu kül, elde edildiği kömürün yanış özelliğine bağlı olarak açık griden koyu griye değişen renkte olan, ince taneli bir malzemedir. Kömürün tam yanmadığı durumda yanmamış karbon etkisiyle uçucu kül siyah renktedir. Yanmanın gerçekleştiği durumda ise uçucu kül diğerine göre daha açık renktedir (Güler 2005).

Uçucu küllerin kimyasal yapılarındaki ana elementler Si, Al, Ca, Fe ve S' dir. Belirtilen elementleri yanma biçimlerine göre  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , FeO,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , CaO ve  $\text{SO}_3$  oluşturur. Bu elementlerin haricinde, daha az miktarda MgO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> gibi oksitler bulunabilir. Uçucu küllerin karbon içeriği termik santrallerin verimine bağlı olmakla birlikte genel olarak yaklaşık % 3 civarındadır (Şimşek 2007).

Uçucu kül partikülleri değişik şekillerde bulunabilirler. Bunlar camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılardır (Yazıcı 2004).

Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon ton/yıl kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Türker vd. 2009).

Ülkemizde 2014 yılında yalnızca kurulu gücü 100MW ve üzeri termik santrallerde 9100 tonu tehlikeli olmak üzere toplam 24.2 milyon ton atık oluşmuştur. Oluşan atığın %98.5'ini mineral atıklar (kül, cüruf, uçucu kül, alçıtaşı, vb.) oluşturmuştur (TUİK 2014). Termik santrallerde 1kWh enerji üretiminde kömürün özelliklerine göre değişmekle birlikte yaklaşık 110 g kül atık madde ortaya çıkmaktadır (Baradan 2012).

Filtreler, ultrasonik çöktürme ve kontrol prosesleri ile 1µm tane boyutuna kadar uçucu küller yakalanabilmektedir. Bacadan kaçan kül miktarı azaldığı için çevre kirliliğini azaltan bu yöntemlerin yatırımı ve işletme maliyeti çok yüksektir (Erdemiş 2001).

Uçucu külün sınıflandırılmasını belirleyen kriter, ürünü oluşturan mineral ve kimyasal bileşenlerin kombinasyonudur. ASTM uçucu külü düşük kireç ve yüksek demir içermesi halinde F sınıfı, düşük kireç ve yüksek kalsiyum içermesi halinde C sınıfı uçucu kül olarak genellemektedir (Dickson 2015).

F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptirler ve bitümlü kömürden elde edilirler. Aynı zamanda F sınıfı uçucu küllerin CaO değeri %10'un altındadır ve düşük kireçli olarak da adlandırılır. C sınıfı uçucu küller ise linyit kömüründen elde edilir. C sınıfı uçucu küllerde CaO oranı %10'dan büyük olduğu için kireçli uçucu kül olarak adlandırılabilir. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğinin yanında bağlayıcılık özelliğine de sahiptir (TMMOB 2017).

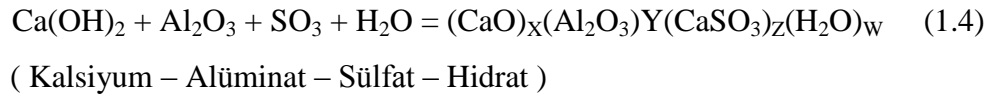
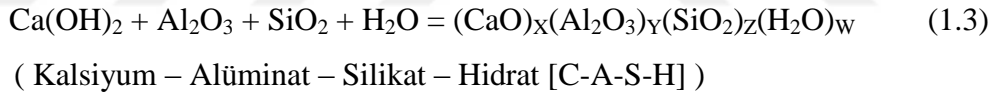
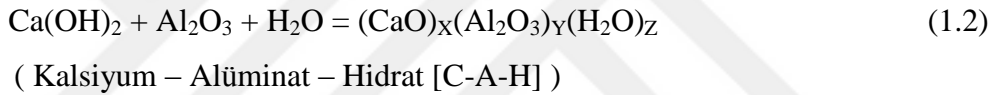
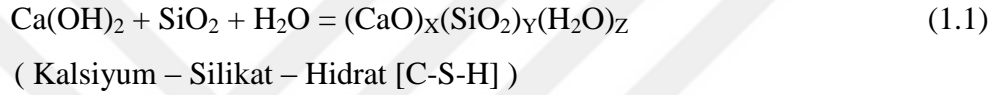
F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler. C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı % 50'den fazla olan küllerdir. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğinin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (ASTM C 618 2000).

V sınıfı küller esas itibariyle reaktif silika ve alüminadan meydana gelmiş olan, reaktif CaO miktarı %5'in altında, reaktif  $\text{SiO}_2$  miktarı ise %25'in üstünde olan uçucu küllerdir. W sınıfı uçucu küller ise reaktif CaO, reaktif  $\text{SiO}_2$  ve alüminadan oluşan, reaktif CaO miktarı %5'in üstünde olan uçucu küllerdir (Tokyay ve Erdoğan 1998).

Eğer bir malzeme kalsiyum hidroksitle tepkimeye girebiliyorsa puzolanik aktiviteye sahip bir malzemedir ve "puzolan" olarak adlandırılır (Mindess ve Young 1981). Sanayi ürünlerinin yan ürünü olarak ortaya çıkan uçucu kül yapay puzolan grubunda yer almaktadır. Uçucu külde puzolanik özelliğinin çok yavaş ortaya çıktığı unutulmamalıdır. Uçucu kül, kireç ve kum karışımına dayanım kazanması için en az 2-3 gün geçmesi gerekmektedir. Sıcaklık ve incelik tepkime hızını olumlu yönde etkiler (Ağar 2007).

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küller ana aktif bileşeni, silis ve alüminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum alüminat, amorf silis ve alümina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler (Tokyay ve Erdoğan 1998).

Bağlayıcılık özelliğine sahip uçucu kül reaksiyonu ve oluşan ürünler (Pollard *et al.* 1992):



Uçucu kül ikamesi portland çimento miktarını azaltması  $\text{C}_3\text{A}$ 'nın ve alkalilerin miktarlarını azaltacağından betonlarda alkali-agrega reaksiyonuna ve sülfatın olumsuz etkisini de düşürmektedir (Erdoğan 2003).

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya  $\text{CO}_2$  kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, %1.0-%10 arasında değişmektedir (Türker vd. 2009).

### 2.3 Yüksek Fırın Cürufu

Cevher içerisindeki demirin elde edilebilmesi için cevherin, içerdiği yabancı maddelerden arındırılması ve demir oksidin ayrıştırılarak içerisindeki oksijenin çıkartılması gerekmektedir. Bu işlemleri yerine getirebilmek amacıyla demir cevherleri, yüksek fırın adı verilen fırınlarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılıp, eritilmektedir. Demir cevheri, kalker taşı ve kok kömürü, fırının üst ucundan sürekli olarak beslenmektedir. Fırındaki sıcaklık etkisiyle kok kömürünün karbonu, cevherin demiroksitindeki oksijenle birleşip karbonmonoksit ve karbondioksit gazları oluşturarak fırını terk ederken, geride eriyik durumdaki demir ile birlikte yine eriyik durumdaki kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve “cüruf” adı verilen malzeme topluluğunu bırakmaktadır (Erdoğan 1995).

Yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda ham demir üretimi esnasında, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alan, hızla soğutulduğunda camsı özellik kazanan ve aktifleştirildiğinde hidrolik bağlayıcı özellikleri olan bir atıktır. Yanma (1600-1800)<sup>0</sup>C arasında gerçekleşir (Tokyay 2009). Demir cevherleri, hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), limonit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.nH<sub>2</sub>O) ve siderit (FeCO<sub>3</sub>) gibi demiroksit bileşenlerinin yanı sıra aynı zamanda küçük bir miktar silis, alümin, kil, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeleri de bünyesinde barındırmaktadır (Doğulu 1998).

Cürufun uygun bir forma getirilmesi ve bağlayıcı bir malzeme olarak kullanılması için granülasyon ve peletleme (hava granülasyonu) olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de cürufun düzensiz bir camsı yapı kazanması için hızlı bir şekilde soğutulması esastır. Cürufun yavaş bir şekilde soğutulması durumunda ise, bağlayıcılık değeri olmayan kristal bir yapı ortaya çıkmaktadır (Newman and Choo 2003).

Eritilmiş haldeki YFC, hızla soğutulma işlemine maruz kalırsa, hidrolik özellik gösteren camsı bir yapıya kavuşur ve oluşan bu malzeme ise granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) adını alır (Topgül 2016).



Cürufların, çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Geleneksel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar, kristal yapıda olduklarından ya hiç kullanılmaz ya da dolgu malzemesi olarak yollarda ve betonda kullanılır. Buna karşılık, modern çelik üretimi yapan tesislerden elde edilen cüruflar, camsı (amorf) yapıya sahip olduklarından, bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkündür. Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (Gündeşli 2008).

Maliyeti azaltmak, karışımın kıvamını artırmak, hidrasyon ısını azaltmak ve nihai dayanımı artırmak için, uçucu kül %30-%70 ve yüksek fırın cürufu %10-%50 arasında çimento ile ikame edilerek kullanılabilir (Jones and McCarthy 2005 b, Papayianni and Milud 2005).

Yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri mutlaka dikkate alınmalıdır. Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır. Taze betonu priz süresini uzatmaktadır, erken dayanımı yavaşlamasına rağmen sonraki günlerde dayanımını artırmaktadır. Betondaki terlemeyi azaltmaktadır. Betonun hidrasyon ısısından dolayı gelen sıcaklığı azaltır. Sertleşmiş betonun su ve klor geçirimsizliğini azaltmaktadır. Sertleşmiş betonun sülfat ve deniz suyuna karşı dayanıklılığını iyileştirir. Alkali-silika reaksiyondan dolayı oluşan genleşmeyi azaltır. Betona güzel perdahlama ve açık renk vermektedir. Betonun özellikle soğuk havalarda daha geç priz almasına yol açmaktadır. Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesine ihtiyaç olmaktadır. İlk zamanlardaki beton dayanım artışı daha yavaş tempoda yer almaktadır (Erdoğan 2007).

Granüle yüksek fırın cürufunun betonda kullanılabilirliğinin belirlenmesinin en iyi yolu dayanım ve dayanıklılık kriterlerine uygun deneylere tabi tutmakla birlikte, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun bağlayıcılık özelliğini etkileyen faktörler; cürufun kimyasal bileşimi, reaksiyondaki alkali konsantrasyonu, cürufun amorflik derecesi, cürufun inceliği, hidrasyonun ilk esnadaki sıcaklığı olarak sıralanabilir (Erdoğan 2003).

Granüle YFC'nin tek başına suyla reaksiyonu, portland çimentolarının hidrasyonundan daha yavaş gelişir. Cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate aluminatlar ve hidrate siliko aluminatların çökmesi cürufun hidrasyonu olarak tanımlanabilir. Cürufun bu reaksiyonu hızlandırması için aktivatörler; alkalin aktivatörler (soda, kireç vb.) diğeri de sülfat aktivatörleri (alçı, fosfojips vb.) olmak üzere iki ana grupta toplanmıştır (Tumluer 2006).

Cüruf hidrasyonunun başlangıç aşamasında silikat iyonları eriyiğe geçer. Daha sonra ilk C-S-H çökmesinin ardından, eriyiğin kireç konsantrasyonu artar ve son olarak da alumina konsantrasyonunda, hidratealuminat kristallerinin oluşumuna kadar artış görülür (TÇMB 2001).

Yüksek fırın cürufunun çimentoda temel olarak iki çeşit kullanımı söz konusudur. Birinci uygulamada YFC, klinker ve alçıtaşı birlikte öğütülerek cürufu çimento üretimi yapılabilir, ikincisinde öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu portland çimentosuna sonradan katkı olarak ilave edilebilir. Çimento sınıflarının Yüksek fırın cürufu yüzdesi Çizelge 2.2'de verilmiştir (Erdoğan 2007).

**Çizelge 2.2** Çimento sınıflarının Yüksek fırın cürufu yüzdesi.

<b>Oksitler</b>	<b>YFC (Kütlece % olarak)</b>
CEM II/A-S	6-20
CEM II/B-S	21-35
CEM III/A	36-65
CEM III/B	66-80
CEM III/C	81-95
CEM V/A	18-30
CEM V/B	31-49

YFC'nin çimentolu sistemlere etkisi parçacık morfolojisinden daha çok tane boyut dağılımı ile ilişkilidir. Tane boyut dağılımı inceldikçe, çimento harcının akıcılığının arttığı görülmüştür. Ayrıca, öğütme işlemi sırasında %0.05 öğütmeye yardımcı katkı ilave edilmesiyle üretilen YFC'nin çimento harcının akıcılığını %18 oranında arttırdığı belirtilmiştir (Wan at al. 2004).

Yüksek fırın cürufları uygun alkalilerle, uygun oranlarda aktive edildiğinde bağlayıcı özellikleri kazanabilmektedir. Bu şekilde Portland çimentosu kullanmadan %100 yüksek fırın cürufu kullanarak da beton üretilebilir (Collins 2001).

Yüksek fırın cüruflu çimentolar kimyasal kompozisyonlarından dolayı, aynı mukavemet sınıfındaki diğer çimentolardan daha yavaş ve daha düşük miktarda hidrasyon ısısı açığa çıkarmaktadır (Bilim 2006).

## **2.4 Köpük Beton**

Köpük betonun uzun sayılabilecek bir geçmişi vardır. Yalıtım malzemesi olarak kullanılmak amacı ile ilk patent olarak 1923'de alınmıştır ( Valore 1954). Köpük beton üzerinde ilk kapsamlı bir inceleme 1954 Valore tarafından sunulmuş ve 1963 yılında Rudnai ve Kinniburgh tarafından ayrıntılı bir çalışma yürütülmüştür. 1963 yılında, hücre yapısının oluşumu yönteminden bağımsız olarak, hücresel betonun bileşimi, özellikleri ve kullanımını özetleyen detaylı bir çalışma yürütülmüştür (Rudnai 1963, Short and Kinniburgh 1963).

Köpük beton başlangıçta boşluk doldurma ve izolasyon malzemesi olarak öngörülmesine rağmen, hafif bünyesi, yapısal özellikleri, malzemedeki tasarrufu, potansiyel olarak uçucu kül vb. atık malzeme kullanımını onu yeniden ilgi odağı haline getirmiştir (Ramamurthy *et al.* 2009).

Üretim ekipmanlarında son 20 yılda önemli gelişmeler kaydedilmiş, daha iyi kalitede yüzey aktif maddeler (köpük katkısı) üretilmiş, daha büyük ölçeklerde köpük beton kullanım imkanı sağlanmıştır. Yüksek akışkanlığa sahip ve nispeten düşük çimentolu malzemeler içeren kendiliğinden yerleşen betonda, yeterli bir gözenek yapısı oluşturmak için kararlılık son derece önem taşır. Oluşan gözenek sistemi karıştırma, yerleştirme ve priz sırasında karalılığını koruyabilmelidir (Khayat and Assaad 2002).

Köpük betonun kararlılığı hiçbir ayrışma ve terleme olmadan, aynı kıvam ve yoğunluk için yaklaşık aynıdır (ölçülen taze harç yoğunluğu/tasarım yoğunluğu). Kararlılık önceden oluşturulmuş köpük ve köpüklü beton olarak iki malzemenin taze hal koşulları için tanımlanır. Özellikle köpük hacmi baz karışıma göre % 50'den daha büyük olduğunda köpüğün kararlılığı köpük beton üzerinde güçlü bir etkiye sahip olacağı beklentisini yükseltir (Aldridge 2005).

Sentetik yüzey aktif maddelerle üretilen köpüklerin gözenek boyutları daha büyük ve açık gözenekli olup, protein kökenli köpük kimyasallarına göre daha az kararlı olduğu söylenebilir (McCarthy 2004).

Jones and McCarthy (2006) yaptıkları bir çalışmada içinde uçucu kül bulunan köpük beton karışımlarda kararlılığın yüksek kül oranından etkilenecek şekilde düşmeye neden olduğunu bulmuşlardır. Bu da, daha yüksek bir köpük hacminin gerektirdiği hedef plastik yoğunluğu elde etmek için ilave serbest su ihtiyacı ile sonuçlanır. Buna karşılık, Nambiar Ramamurthy (2007)'e göre başlangıçta belirlenen kararlı haldeki köpük beton karışımının ortam koşullarında ölçülen yoğunluğu, tasarım yoğunluğuna eşit yada çok yakındır.

Kaynaklar çoğunlukla suyun köpükten ayrılarak düşmeye neden olmasını önlemek için baz karışımının S/Ç oranının oldukça yüksek tutulmasını önermiştir. Her ne kadar çöküşün derecesi tahmin edilemez ve karışımın bileşenlerine göre değişirse de karıştırma ve taşıma sırasında köpüğün çöküşüne dikkat çekmişlerdir. Ayrışma sıklıkla kararsızlığın bir ölçüsü olarak dikkate alınır (Jones and McCarthy 2006).

Nambiar and Ramamurthy (2008) yaptıkları çalışmada köpük betonun kararlılığını etkileyen faktörlerin; baz karışımının su miktarı, ilave edilen köpük miktarı ve karışımdaki diğer katı bileşenlerin etkili olduğunu belirlediler. Ancak bunlara ilave olarak diğer olası faktörlerin de araştırılması gereklidir.

Köpük betonun birim ağırlığı hem taze halde, hem de sertleşmiş haldeki beton için belirlenir. Taze birim ağırlığı karışımın tasarımı ve dökümün kontrolü için gereklidir. Bununla birlikte, köpük beton fiziksel özelliklerinin çoğu sertleştirilmiş haldeki birim ağırlığa bağlı ve ilişkilidir (Ramamurthy *et al.* 2009).

Durack and Weiqing (1998) Çimento-uçucu kül bazlı köpük beton ile çimento-kum bazlı köpük betonun özelliklerini incelediler. Çalışmada uçucu kül katkının birim ağırlığı azaltırken mukavemet gelişimini olumlu etkilediği belirlenmiştir. Belirli bir birim ağırlıkta köpük beton elde etmek için kullanılan uçucu külün, daha düşük özgül ağırlığa sahip olması nedeniyle köpük ihtiyacını azalttığını belirlemişlerdir. Köpüğün üretiminden itibaren genişlemeye devam etmesi ve karıştırma sırasında bir miktarının kaybolması vb. sonuçları etkileyen bir dizi faktör nedeniyle taze birim ağırlığı hesaplamak için teorik bir denklem geçerli olmayabilir (Regen and Arasteh 1990). Bünyesinde agrega olmadığından köpük betonun kuruma küçülmesi normal betona göre 10 kat daha fazladır (Valore 1954).

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

Nispeten katı kıvamda bir beton karışımı, hava kabarcıklarının patlamasına neden olabilirken, yüksek kıvamlı (aşırı akışkan) bir harç karışımı ise bünyesindeki hava kabarcıklarını tutma yeteneğini kaybederek ayrışmaya neden olabilir. Bu nedenle karalılığı sağlamak için yoğunluk oranları (örneğin, taze beton yoğunluğu ve sertleşmiş beton yoğunluğu oranları) 1:1 yakın olmalıdır (Ramamurthy *et al.* 2009).

Polipropilen lifler betonun enerji yutma kapasitesine katkı sağlamasa da darbe dayanımına ve aşınma direncini artırarak, geçirgenliği azaltarak, donma ve çözünme sonrasında betonda meydana gelen olumsuzlarda azalma sağlamakta, betonda oluşan kuma miktarını azaltarak düzgün bir yüzey oluşumuna katkı sağlamaktadır (Şimşek 2007).

Otoklav kürü uygulaması mineralojik yapıyı değiştirerek, buhar kürüne göre kuruma küçülmesini %12-%50 arasında azaltmaktadır. Köpük betonda rötre değeri düşen yoğunlukla birlikte artma eğilimi gösterir. Düşük yoğunluktaki harç hamuru bu karışımlarda rötreye sebep olmaktadır. Rötre değerleri hafif-gözenekli agregalar kullanılarak azaltılabilmektedir. Köpük betonda agrega kullanılmaması nedeniyle, normal betona göre daha fazla rötre gerçekleşebilmektedir. Rötrenin köpük betonda yüksek olması nispeten yüksek çimento oranı, yüksek su miktarı, iri taneli agrega eksikliğinden kaynaklanır (Gelim 2011).

Rötre miktarı köpük miktarındaki artışa (yoğunlukta azalma) ve sıcaklık artışına bağlı olarak artar. Köpük betonda dozaj çok yüksek olmamakla birlikte karşımı oluşturan dolgu malzemeleri (kalsit, mermer tozu, vb.) ile puzolanik katkılar (uçucu kül, vb.) çimento inceliğinde tane boyutuna sahiptir (Demir 2014).

Karışımındaki ince malzemenin yüksek olması, toplam yüzey alanının artmasına ve sonuçta toplam büzülmede artışa yol açmaktadır. Köpük betonun birim ağırlığına bağlı olarak mukavemet değerleri normal betona göre oldukça düşüktür. Buna göre yüksek oranda ince malzemenin neden olduğu yüksek orandaki büzülme değerlerinin neden olduğu iç gerilmeler, bünyenin mukavemet değerlerini aştığı durumda büzülme çatlakları gelişmektedir (Demir 2014).

Karışımındaki çimento miktarının artması ile çimento hamurunun rötre gelişimini artıracak dikkate alınmalıdır. Buna göre çimento dozajının  $300 \text{ kg/m}^3$  geçmemesi uygun olacaktır. Köpük beton karışımında su/çimento oranını mümkün olduğunca düşük tutulması ve su azaltıcı yapı kimyasalların kullanılması uygun olacaktır. Böylece karışımındaki su miktarı azalacağı için rötre gelişimi sınırlanacaktır. Karışımında kullanılacak köpük yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda rötre değerleri artmaktadır. Köpük yoğunluğunun 45-50 g/L'den daha düşük değerlerde kullanılması rötre çatlaklarını artırıcı etki yapmaktadır. Bu değerlerin üzerinde köpük yoğunluğu (60-70 g/L) kullanılması uygun olacaktır. Karışımındaki köpük miktarının artması rötreyi olumsuz etkilemediği deneysel çalışmalardan ve literatürdeki verilerden ortaya konulmuştur (Demir 2014).

Uçucu kül katkısının gerekli karışım suyu miktarını bir miktar artırmakta ve buna bağlı olarak büzülme bir miktar artırıcı etkisi olmaktadır. Bununla birlikte puzolanik özelliği nedeniyle mukavemet gelişimine katkısı önemli olmaktadır. Çimento miktarının %20-%30'u kadar uçucu kül kullanımı mukavemet değerlerini artırıcı etki yapmaktadır. Köpük betonda normal olarak iri taneli agrega bulunmaz. Ancak tamamen ince taneli malzeme bileşimi ile üretilen köpük beton, özellikle düşük birim ağırlık değerlerinde üretildiğinde rötre çatlaklarının gelişime ihtimali oldukça yüksektir. Buna göre köpük beton karışımında belli oranda iri taneli malzeme kullanılması rötre çatlaklarını önlemede oldukça etkili olabilmektedir. İri taneli malzeme olarak hafif agregaların kullanılması ve 1 mm – 2 mm aralıkta olması uygun olacaktır. Pomza kumu, genleşmiş perlit, diyatomit vb. hafif bünyeli agregaların kullanılması rötre çatlaklarının gelişimini önleyici etki yapmıştır. 1 m<sup>3</sup> köpük beton karışımı içinde 50 litre hafif agrega (genleşmiş perlit, diyatomit vb.) bulunması rötre çatlaklarını engelleyici etki yapmaktadır. Köpük betonda büzülme çatlaklarını engellemek amacı ile lif katkısı kullanmak uygun olmaktadır. Çimento miktarının %0.5-%1 arasında polipropilen veya cam elyaf katkısı büzülme engelleyici etki yapmaktadır (Demir 2014).

Son 20 yılda köpük kimyasalı üretimindeki gelişmeler köpük beton uygulamalarının artmasını ve çeşitlenmesini sağlamıştır. Protein yada sentetik kökenli köpük ajanları kullanılarak basınçlı hava yardımı ile bileşiğin mekanik veya kimyasal reaksiyonu sonucu hava boşluğu (kabarcıklar) oluşur. Köpük beton adını alan %10-%70 arasında hava boşluklarından oluşan hafif beton malzeme ortaya çıkar. Hafifliğine karşı yapısal kullanımını azaltıcı yönde basınç dayanımı olumsuz yönde etkilenir (Uddin *et al.* 2006, Ramamurthy *et al.* 2009).

Köpük beton için önce bir jeneratörde köpük üretilir. Bunun için iki jeneratör sistemi mevcuttur. Hava basınçlı bir mikser hattı içinden köpük çözeltisi geçirilerek köpük üretilir. Köpük çözeltisi 40 kata kadar genleşerek düşük yoğunlukta köpük üretilir. İkinci sistemde köpük çözeltisi bir tüp içindeki tel örgü (bulaşık teli vb.) üzerine tüpün çıkış ucundan emilmek suretiyle püskürtülür. Köpük beton katkıları su ile seyreltikten sonra bir köpük jeneratöründen geçirilerek üretilen, tıraş köpüğüne benzeyen ve kararlı köpük oluşturan yüzey aktif maddelerdir (Demir 2014).

Köpük beton ajanlarının köpük betondaki rolü çözeltilerin yüzey gerilimini azaltmak ve hava kabarcıklarının stabilitesini artırarak küçük ve kapalı hava kabarcıkları oluşturmaktır. Köpük beton üretiminde tipik olarak, yüzey aktif sentetik veya protein esaslı köpük kimyasalları kullanılmaktadır. Her iki tip ajan da çözeltilerin yüzey gerilimini düşürerek, kararlı hava kabarcıklarının oluşumunu kolaylaştırır (Panesar 2013).

Sentetik köpük ajanları güçlü hidrofilik ve su içinde kolayca çözülen hava kabarcıkları oluşturan çözücü maddelerdir. Ancak, karmaşık bir kimyasal ortam olan taze betona sentetik maddeler katılırken, istenen miktarda hava sürüklemek ve betonun mikro yapısının gelişimi için yüzey aktif madde ve çimento tanelerinin uyumluluğu çok önemlidir (Panesar 2013).

Protein kökenli köpük ajanlarının hava sürükleyici mekanizması sentetik kökenlilerden farklıdır. Organik esaslı olanlar proteinlerin bozunması sonucu hava kabarcıkları üretir. Büyük protein moleküllerinin peptid bağları kırıldığı için, daha fazla hidrofobik küçük moleküller oluşur. Bu işlem hem de çözeltilerin yüzey gerilimini düşürüp ve kabarcıklar arasında ara yüzey oluştururken, aynı zaman molekül gurupları arasındaki hidrojen bağları da kararlı hava kabarcıkları oluşmasına yardım eder. Protein köpük ajanlarının etkinliği, sıcaklık ve pH ile etkilenmektedir. Literatürde, protein ve sentetik köpürme ajanlarının her ikisi de dünya ölçeğinde mevcuttur ve kullanılmaktadır. Protein esaslı bir köpük ajanı kullanılarak su ile hacimce 1:40 oranında seyreltilerek 70 g/L yoğunlukta köpük elde edilmiştir (Bing *et al.* 2012).

Su ile seyreltme oranı değiştirilerek istenilen yoğunlukta köpük üretilebilmektedir Köpük katkıları hava sürükleyici madde olarak da tanımlanır. Hava sürükleyici ajanlar organik malzemeleri içermektedir. Köpük maddeleri karışımı suyuna ilave edildiğinde çimento hamurunun bünyesinde birbirinden bağımsız kabarcıklar oluşur. Protein bazlı köpükler yaklaşık 80 g/L arasında bir ağırlığa sahiptir (Brady and Jones 2001).



Protein temelli köpük maddeleri hayvansal kökenli proteinlerden üretilir. Bunların üretiminde farklı hammaddeler ve karışımlardaki farklılıklar nedeniyle hem kalitede değişmelere ve aynı zamanda, köpük kimyasallarında çok yoğun bir kokuya yol açabilmektedir. Sentetik köpükler, yaklaşık 40 g/L bir yoğunluğa sahiptir. Bunlar 1000 kg/m<sup>3</sup> üstünde üretilecek betonlar için çok iyi kararlılık ve mukavemet değerleri verirler (Brady and Jones 2001).

Köpük üretimi iki ayrı yöntemle üretilebilmektedir. Ön köpük üretim yöntemi ve köpük katkısının karışıma katılması olarak dikkat çekmektedir. Ön köpük yönteminde köpük önceden üretilerek hazırlanan harç içerisine ilave edilmek suretiyle beton üretilir. Karışıma köpük kimyasalı ilave yönteminde ise yüzey aktif katkı harç karışımına ilave edilerek birlikte karıştırılır ve gözenekli bir köpük beton bünye yapısı oluşur (Hunaiti 1997, Perez and Cortez 1997, Ramamurthy and Nambiar 2009, Laukaitis *et al.* 2005).

Kullanılan çeşitli köpük ajanları bulunmaktadır, bunlar; deterjanlar, reçine sabunu, tutkal reçineleri, saponin ve hidrolize proteinlerdir. Genellikle ön köpük üretim yöntemi ile beton üretiminde hidrolize protein bazlı köpük ajanı kullanılmaktadır. Köpük ajanı önce su ile seyreltilir. Su ile seyreltilen köpük ajanı jeneratörde yüksek basınç altında filtre sistemi bulunan borudan geçirilerek köpük elde edilir. Bu köpük solüsyonu hacminin 20-25 katı daha fazla hacimde düzenli ve kararlı bir köpük üretir. Çimento hamuru ile oluşan harca köpük ilave edilerek köpük beton üretilir (Karl and Worner 1993).

Çimento hamuruna köpük ilave edilerek karıştırıldığında çimento hamurunda reaksiyon başlayacaktır. Köpük konsantresi, üretim, karıştırma ve pompalama sırasında ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal etkilere karşı hava kabarcıklarını muhafaza edebilen ve betonun prizi süresince bu özelliklerini koruyabilen bir kimyasal bileşime sahip olmalıdır. Eğer bu süreçte kabarcıkların yapısı kararsız hale gelirse, çökme olabilir ve beton yoğunluğunda artış gerçekleşir. En yaygın olarak kullanılan özel köpük konsantre formülasyonları, protein hidrosilasyonu ya da sentetik yüzey aktif maddeler içerir. Kabarcıkların %75-%85'inin çapları 0.3 mm - 1.5 mm arasında bulunmaktadır (Karl and Worner 1993).

Köpüğü üretmeden önce harcı hazırlamak önemlidir. En uygunu üretilen köpüğün doğrudan harcın karıştırıldığı mikserle gönderilmesidir. Mikser dakikada yaklaşık 10 devir yapacak hızda dönmelidir. Köpüğün tamamının harç içerisinde homojen karışmasına dikkat edilmelidir. Köpük betonda kullanılacak su içilebilir nitelikte olmalı ve asitler, alkaliler, tuzlar, yağ ve diğer organik maddeler zararlı miktarda olmamalıdır. Eğer uygun fiziksel özelliklere sahip ise içilmeyen sular da kullanılabilir (Karl and Worner 1993).

Köpük beton harcının akış özellikleri geleneksel harçlardan farklıdır. Akma sınırları çok düşük olduğu için kendinden akışkanlık özelliği gösterir. Köpük betonun akışkanlık özelliklerini belirleyen çok sayıda faktör vardır. Bunlar temel olarak; su/çimento oranı, su/toz oranı, çimento tipi, köpük ajanının tipi, köpük yoğunluğu, dolgu malzemesinin tipi ve oranı, seçilen taze harcın yoğunluğu vb. olarak sayılabilir (Banfill 2006).

Bu nedenle köpük beton harcının reolojik özellikleri ile nihai beton özellikleri arasında sıkı ilişkiler kurulabilir. Reolojik özelliklerin bilinmesi aynı zamanda köpük beton harcının işlenebilirliği, pompalanabilirliği ve kararsızlığı hakkında da önemli bilgiler verir. Viskozite, sıvıların akmaya karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanmaktadır. Kısa bir ifadeyle akışmazlık olarak tanımlanan bu fiziksel özellik Dinamik ve Kinematik viskozite olarak iki ana başlık altında incelenmektedir. Sıvıların deformasyonu ile ilgili farklı akış mekanizmaları vardır. İdeal sıvılar genellikle Newtonian akış özellikleri gösterirler. Kayma gerilimi deformasyon ile doğru orantılı olarak artar. Ancak doğadaki birçok sıvı sistem, Newtonian akış eşitliğine uymazlar. Kaymanın başlaması için belirli bir akma sınırının aşılması gerekir. Bu tip bir akma eşiği gösteren sıvılar Bingham akış özelliğine göre davranır (Banfill 2006).

Gözenek yapısının büyümesi hem mekanik özellikleri (basınç dayanımı), hem de fiziksel özellikleri (ısı iletim katsayısı) olumsuz etkilemektedir (Visagie and Kearsley 2002). Üretilen köpük yeterince katı, sıkı ve kararlı olmalı ki; çimentonun priz başlangıcına kadar harcın oluşturduğu basınca karşı koyabilsin ve gözenekleri hava ile dolu hafif beton bünye güçlü bir iskelet yapısı kazanabilsin (Ramamurthy *et al.* 2009).

Köpük betonda lif katkısı kullanılabilir. Ticari olarak temin edilebilen lifler arasında; çelik, alkaliye dayanıklı cam; akrilik, aramit, karbon, naylon, polyester, polietilen gibi sentetik elyaflar, polipropilen ve rafine yada ham selüloz, hindistan cevizi ve bambu gibi doğal elyaflar kullanılabilir (Zollo and Hays 1998).

Betonun performans gereksinimlerine uygun lif seçimi yapılmalıdır. Köpük betonun normal betona eşdeğer kesme davranışı geliştirmek için 1 m<sup>3</sup> köpük betona 1 kg-3 kg polipropilen lif katkısı ilave edilebilir. Ayrıca lif kullanımı maliyeti düşürürken, betonun gevrekliğini azalttığı belirtilmiştir (Kearsley 1999). Harca katılacak lif tipi, hava içeriği (köpük miktarı) ve S/B oranı optimize edilerek, optimum mukavemet değeri, süneklik, yoğunluk, işlenebilirlik ve aynı zamanda uygun maliyet sağlanabilmektedir (Yamamoto *et al.* 1999).

Köpük beton üretiminde kür şartları önemlidir. Suda kür edilen köpük beton, düşük mukavemet sergilerken 50<sup>0</sup>C'de kür edilen ve plastik örtü ile sarılıp 22<sup>0</sup>C'de sabit sıcaklıkta kür edilen örnekler yüksek mukavemet kazanmışlardır. Artan kür sıcaklığına bağlı olarak örneklerin basınç dayanımlarında artışlar olsa da maliyet etkin olarak dikkate alınmaz (Kearsley 1999).

Kür kalıba yerleştirildikten sonra başlar ve beton istenen mukavemet ve sertliğe ulaşmaya kadar devam eder. Kaliteli beton elde etmek için, kür sürecinde beton bünyesinden nem kaybını önleyip aynı zamanda yeterli bir sıcaklık rejimi sağlamak son derece önemlidir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Standart kür altında matrisin genişlemesi, standart kürden önce buhar kürü uygulamasına göre yaklaşık 10 kat daha fazladır. Bununla birlikte, köpük beton genişleme yüzdesi baz karışıma göre daha düşüktür ve köpük hacminin artışı genişlemeyi azaltmaktadır. Buna ek olarak, buhar kür sonrası doğal kür altında kül katkılı köpük betonun toplam rötre değeri daha küçüktür, külün genişlemesi köpük betonun büzülmesini telafi etmektedir. Ayrıca, kum veya polipropilen fiber ilavesi ile uçucu kül katkılı köpük betonun rötre değerleri daha da azaltılabilir (Chen *et al.* 2014).

### 3. MALZEME ve METOT

#### 3.1 Kullanılan Malzemeler

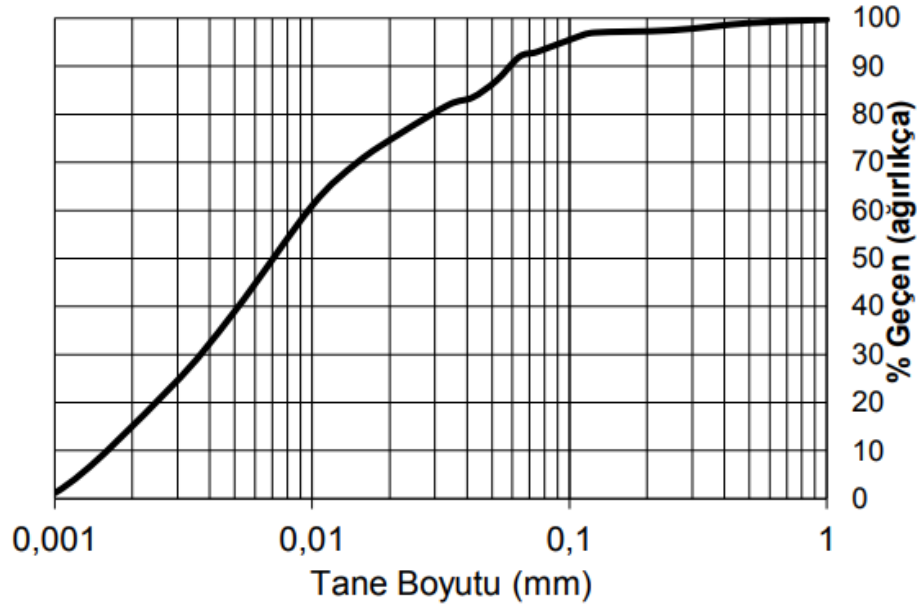
##### 3.1.1 Mermer Tozu

Çalışmada kullanılan mermer tozu Afyon İncehisar Bölgesinde bulunan mermer atık deposundan temin edilmiştir (Resim 3.1). Mermer tozu ince tane boyutuna sahip olduğundan kırma ve öğütme işlemlerine gerek duyulmadan eleme işleminden sonra doğrudan kullanılabilme imkanına sahiptir (Resim 3.2). Afyon İncehisar mermerinin kimyasal analizinde CaO oranı %50'yi geçmiş olup kızdırma kaybı %41.16 olarak belirlenmiştir. Tane boyutu analizinde mermer tozunun  $d_{50}$ : 70  $\mu\text{m}$  olup, % 97'si 100  $\mu\text{m}$ 'den küçük boyuta sahiptir (Şekil 3.1). Afyon İncehisar mermerine ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1** Afyon İncehisar mermer tozunun kimyasal analiz sonuçları (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	KK
4.67	-	-	0.03	51.80	0.40	-	-	41.16

\* KK: Kızdırma Kaybı



**Şekil 3.1** Afyon İncehisar Bölgesi mermer tozu tane boyutu dağılımı.



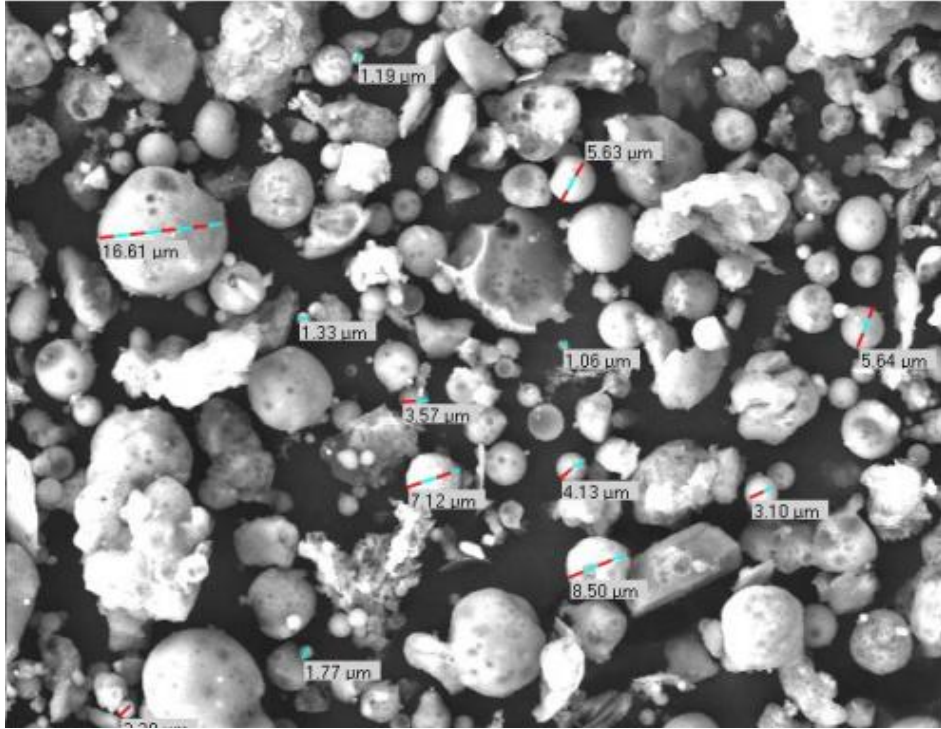
**Resim 3.1** Atık deposundan alınan mermer tozu.



**Resim 3.2** Kullanıma hazır mermer tozu.

### 3.1.2 Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül; Afyon ilindeki bir hazır beton tesisinden alınmış olup, Kütahya Seyitömer uçucu külü kullanılmıştır.



**Resim 3.3** Seyitömer termik santrali uçucu külü SEM görüntüsü.

Seyitömer termik santrali uçucu külü morfolojik olarak incelendiğinde 1.06  $\mu\text{m}$  ile 16.61  $\mu\text{m}$  arasında parçacık büyüklüğünün değiştiği görülmektedir (Resim 3.3).

Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10' un altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının % 25' in üzerinde olması nedeniyle de TS EN 197-1' de V sınıfı uçucu kül için istenilen koşullara tamamen uymaktadır. Seyitömer uçucu külüne ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir (Türker vd. 2003).

**Çizelge 3.2** Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>S+A+F</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cl</b>	<b>KK</b>
54.49	20.58	9.27	84.34	4.26	4.48	0.52	2.01	0.65	0.006	3.01

\* KK: Kızdırma Kaybı

### 3.1.3 Yüksek Fırın Cürufu

İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nda yan ürünü olarak ortaya çıkan öğütülmüş YFC hafif beton örneklerin üretiminde kullanılmıştır. YFC'nin kimyasal yapısında majör bileşikler olarak SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranı %50.91 ve CaO %32.61 olarak bulunmakta ve diğer safsızlıklar yer almaktadır. İskenderun Demir Çelik Fabrikası'nın atığı olan YFC' na ait kimyasal içerik, Çizelge 3.3'de verilmiştir (Bilim ve Atış 2011).

**Çizelge 3.3** İskenderun Demir Çelik Fabrikası YFC kimyasal analiz sonuçları (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>S</b>	<b>CaO</b>	<b>TiO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>
36.70	14.21	0.98	0.13	32.61	-	0.99	0.76	0.42	10.12

YFC'lerin tümü sadece granüle, ufalanmış YFC'lerdir. Kimyasal bileşim camlaşma derecesi üzerindeki etkinliği yanında hidrasyon sürecindeki ana faktör olan eriyiktik (solubilité) niteliğini de denetler. Bu denetleme CaO/SiO<sub>2</sub> oranı ile ilgilidir. Bu oranın yüksek olması eriyikliğı artırır, ancak camlaşma bazı suda söndürme (trampaj) süreçlerinde güçleşir (Kondo 1962). İskenderun Demir Çelik Fabrikası YFC' nun dane birim hacim ağırlığı ortalama 2.80 gr/cm<sup>3</sup>, Blaine özgül yüzeyi ise 4250 cm<sup>2</sup>/gr' dır.

### 3.1.4 Çimento

Bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu seçilmiştir. Priz süresini kısaltmak ve erken mukavemeti geliştirmek amacı hızlı sertleşen tipteki çimentolar, yüksek alüminalı çimentolar ve kalsiyum alüminalı çimentolar tercih edilmelidir. Portland çimentosu klinkeri ve alçıtaşından oluşmaktadır. Erken kalıp alınması gerektiği durumlarda kullanılması uygun olan bu ürün köpük beton bünyesindeki köpük yapısı için uygun görülmüştür. CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosuna ait kimyasal (Çizelge 3.4), fiziksel (Çizelge 3.5) ve mekanik (Çizelge 3.6) özellikler verilmiştir (Göltaş 2014).

**Çizelge 3.4** Klinkerin Kimyasal Özellikleri (%).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub>	MgO
20.52	4.00	3.45	64.28	2.53	1.35	1.63

**Çizelge 3.5** CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu Fiziksel Özellikleri.

<b>Çimento Fiziksel Özellikleri</b>	
Hacimsel Genleşme (mm)	≤ 1
İncelik (90 $\mu$ m, %)	0.10
İncelik (200 $\mu$ m, %)	1.10
Özgül Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3340
Priz Başlangıcı (dak)	185
Priz Sonu (dak)	240
Özkütle (g/cm <sup>3</sup> )	3.12

**Çizelge 3.6** CEM I 42,5 R Tipi Portland Çimentosu Mekanik Özellikleri.

<b>Çimento Mekanik Özellikleri (MPa)</b>	
7 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	5.8
28 Günlük Eğilme Dayanımı (MPa)	7.2
7 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	39.3
28 Günlük Basınç Dayanımı (MPa)	51.0

### 3.1.5 Kireç

Sönmemiş kireç Afyondaki bir kireç fabrikasından alınmıştır. Kirecin kimyasal analizleri Çizelge 3.7’de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.8’de verilmiştir (Anonim 2008).

**Çizelge 3.7** Kirecin Kimyasal Özellikleri (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>R<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>
0.06	0.27	92.12	0.07	0.52	0.22

**Çizelge 3.8** Kirecin fiziksel analizleri.

<b>Fiziksel analizler</b>	
90 µm üzeri	4.52
Reaktivite(t <sub>60</sub> )	37sn
Erime noktası	2600°C
Hacim ağırlığı	0.7-1.2 kg/dm <sup>3</sup>
Özgül ağırlık	3.35 g/cm <sup>3</sup> (20 °C de)
Suda çözünebilirlik	0 °C’ de 1.4 g/L , 20 °C’ de 1.25 g/L
Verim	2.48 dm <sup>3</sup> /kg

### 3.1.6 Alçı

Alçı ticari olarak kullanılan ve hızlı sertleşen kartonpiyer alçısı kullanılmıştır. Kartonpiyer alçısı kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.9’da, fiziksel analiz sonuçları ise Çizelge 3.10’da verilmiştir (Şener 2010).

**Çizelge 3.9** Alçı kimyasal analiz sonuçları (%).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>Cl</b>	<b>MgO</b>	<b>KK</b>
0.2	32.45	44.49	0.41	0.0036	20.63

\* KK: Kızdırma Kaybı



**Çizelge 3.10** Kartonpiyer alçısı fiziksel analizleri.

<b>Fiziksel analizler</b>	
Alçı/Su Oranı	100 gr alçı/ 70 gr su
Kullanma Süresi	7- 12 dakika
Donma Süresi	20-30 dakika
Basınç Mukavemeti	≤ 8.0 N / mm (7 gün sonra)
Eğilme Mukavemeti	≤ 3.0 N / mm (7 gün sonra)
Birim Hacim Ağırlığı	645 gr/lt
Tane Boyutu	45µm üzeri % 8-10 160 µm üzeri % 0- 1.0
Ph	7- 8
Yüzey Sertliği	60 shore D
Blaine	5100 cm <sup>2</sup> /gr

### 3.1.7 Kalsit

Nano boyutlara kadar taneler bulunan kalsit hammaddesi temin edilmiş ve bu ürün PCC kalsit olarak anılmaktadır. PCC, kimyasal yöntemlerle üretildiğinden dolayı, tanecik şekli, tanecik boyutu ve tanecik boyut dağılımı kontrol altında tutulmakta ve bu nedenlerden dolayı öğütülmüş kalsiyum karbonata (GCC) göre avantajları bulunmaktadır. Doğal kalsiyum karbonatın kimyasal çöktürme işlemi sonucunda kazanmış olduğu bu yapı, malzemeye, çarpma dayanımı, parlaklık, opaklık gibi artı özellikler kazandırmaktadır. Kalsit malzemenin kimyasal özellikleri Çizelge 3.11’de verilmiştir (Kılıç 2015).

Çalışmada kullanılan kalsit malzeme büyük ve küçük tane boyutlarına sahip olarak seçilmiştir. Kullanılan kalsit örnekleri büyük tane boyutlu; d<sub>50</sub> boyutu 20 µm, d<sub>97</sub> ise 40 µm boyutuna sahiptir. Küçük tane boyutlu kalsit d<sub>50</sub> boyutu 2.5 µm, d<sub>97</sub> ise 7 µm’dir.

**Çizelge 3.11** Kalsit malzemenin kimyasal özellikleri (%).

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>MgCO<sub>3</sub></b>	<b>CaCO<sub>3</sub></b>
0.18	0.01	0.10	0.11	0.36	99.24

### 3.1.8 Kimyasal Katkılar

Çalışmada akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı yapı kimyasalları kullanılmıştır (Resim 3.4). Sikament FFN, betonun karma suyunu yüksek oranda azaltarak erken ve son dayanımları artıran veya aynı miktarda su ile betona yüksek oranda akışkanlık kazandıran süper akışkanlaştırıcı beton katkısıdır. Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvıdır. Betonda istenilen performansa bağlı olarak, bağlayıcı dozunun %0.8–%3.0 aralığında (100 kg bağlayıcı için 800–3000 gr) kullanılır. Optimum katkı dozu, kullanılan bağlayıcı ve agrega kalitesi, su/bağlayıcı oranına göre belirlenir. Sikament FFN katkı maddesi özellikleri Çizelge 3.12’de verilmiştir (İnt.Kyn.1).

SikaRapid-1, sertleşme hızlandırıcı beton ve harç katkısıdır. Organik ve inorganik maddelerin karışımıdır. Son dayanımları olumsuz etkilemeden betonun erken dayanımlarını yükseltir. İstenilen hızlandırma etkisine bağlı olarak betonun içerdiği bağlayıcı ağırlığının %0.5–%1.5’i oranında kullanılır. SikaRapid-1 katkı maddesi özellikleri Çizelge 3.13’te verilmiştir (İnt.Kyn.1).

**Çizelge 3.12** Sikament FFN katkı maddesi özellikleri.

<b>Analiz türü</b>	
Yoğunluk	1.15 – 1.19 kg/l, 20°C’de
pH Değeri	7–11
Donma Noktası	-10°C
Toplam Klorür İyon İçeriği	En fazla %0.1, klorür içermez
Alkali Miktarı (%Na <sub>2</sub> O)	En fazla %7

**Çizelge 3.13** SikaRapid-1 katkı maddesi özellikleri.

<b>Analiz türü</b>	
Yoğunluk	1.17±0.02 kg/lt.
pH Değeri	7–10
Donma Noktası	-15°C
Viskozite	5.5 cP, +20°C’de
Suda Çözünebilir Klorür Yüzdesi	Maks. %0.1



**Resim 3.4** Kimyasal katkıları.

Köpük katkıları hava sürükleyici madde olarak da tanımlanır. Hava sürükleyici ajanlar organik malzemeleri içermektedir. Köpük maddeleri karışım suyuna ilave edildiğinde çimento hamurunun bünyesinde birbirinden bağımsız kabarcıklar oluşur. Köpüğün kalitesi köpük beton özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada ticari bitkisel protein esaslı köpük kimyasalı kullanılmıştır. Köpük kimyasalı su ile 1/20-30 arasında seyreltilerek köpük üretilebilmektedir. Köpük marinasında üretilen köpüğün yoğunluğu tartılarak kontrol edilmiştir (Resim 3.5). Çalışmada 80-90 g/L aralığında köpük kullanılmıştır.



**Resim 3.5** Köpük Makinesi ve Köpük Yoğunluğu Kontrolü.

Karışımlardaki çimento bağlayıcının %0.5 oranında polipropilen elyaf kullanılmıştır (Resim 3.6). Polipropilen elyaf özellikleri Çizelge 3.14’te verilmiştir (İnt.Kyn.2).

**Çizelge 3.14** Polipropilen elyaf özellikleri.

<b>Analiz türü</b>	
Fiber uzunluğu	6.12mm
Çekme mukavemeti	350MPa
Özgül Yoğunluk	0.91 gr/cm <sup>3</sup>
Yumuşama noktası	140 °C
Nem tutma	-
Çimento uyumu	Çok iyi
Ergime noktası	165-170 °C

Elyaf katkısı taze betonun akışkanlık özelliklerini etkileyerek hücresel yapının kararlılığını artırıcı etki yapabilmektedir. Elyaf katkısı erken yaştaki çekme dayanımını geliştirerek, plastik haldeki köpük betonun mekanik özellikleri geliştirmektedir. Ayrıca sertleşmiş köpük betonun çatlama sonrası eğilme ve çekme dayanımı, darbe dayanımı, enerji soğurma ve pullanma direncini geliştirmektedir (Zollo and Hays 1998).



**Resim 3.6** Polipropilen elyaf.

## 3.2 Numune Üretim ve Deney Yöntemleri

### 3.2.1 Karışım Oranları ve Deney Numunelerinin Üretimi

İstenen özelliklere sahip köpük beton elde etmek için deneysel metot benimsenmiştir. Köpük beton harcı, belirlenen döküm yoğunluğunda malzemelerin üniform bir şekilde dağılması için, mekanik olarak karıştırılmıştır. Harcın yoğunluğunu ve kıvamını değiştirebileceğinden uzun süre karıştırmadan kaçınılmıştır. Köpük beton üretiminde kullanılacak malzemeler belirlenen karışım oranlarına göre tartılarak hazırlanmıştır.

Çalışmada mineral malzemeler dolgu olarak (mermer tozu) ve puzolanik katkıları (UK ve YFC) olarak karışıma ilave edilmiştir. Örnekler karışımlarına göre 5 ana grupta üretilmiştir. Kendi gurupları içinde taze harç ağırlığı ve kuru birim hacim ağırlıkları (BHA) bakımından farklı değerlerde üretilmiştir. Ayrıca bazı serilerde çimentonun %5'i oranında sönmemiş kireç (SK) ve kartonpiyer alçısı karışıma ilave edilmiştir.

Birinci grup örneklerde (seri 1-8 arası) 4 birim çimento ve 2 birim mermer tozu kullanılarak köpük beton üretilmiştir. Mermer tozuna oranla çimento oranı yüksek tutularak hidrasyon reaksiyonu incelenmiştir (Çizelge 3.15).

**Çizelge 3.15** 1. grup numunelerin karışım oranları.

Seri	Çim.	MT	UK	YFC	SK	Alçı	Köp.(g/L)	Harç(g/L)	Su	S/Ç	S/T
1	4	2	-	-	-	-	80	680	3.0	0.75	0.50
2	4	2	-	-	-	-	80	700	3.0	0.75	0.50
3	4	2	-	-	-	-	80	715	3.5	0.88	0.58
4	4	2	-	-	-	-	80	730	2.85	0.71	0.48
5	4	2	-	-	-	-	80	750	2.75	0.69	0.46
6	4	2	-	-	-	-	80	770	3.1	0.78	0.52
7	4	2	-	-	-	-	80	780	3.45	0.86	0.58
8	4	2	-	-	-	-	80	810	3.0	0.75	0.50

\* Çim.: Çimento, MT: Mermer Tozu, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek Fırın Cürufu, SK: Sönmemiş Kireç, S/T: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

İkinci grup örneklerde (seri 9-13 arası) 4 birim çimento 4 birim mermer tozu kullanılmıştır. Mermer tozu oranının karışımda artırılması ile çimentonun bağlayıcılık oranının ne derece değişim göstereceği incelenmiştir (Çizelge 3.16).

**Çizelge 3.16** 2. grup numunelerin karışım oranları.

Seri	Çim.	MT	UK	YFC	SK	Alçı	Köp.(g/L)	Harç(g/L)	Su	S/Ç	S/T
9	4	4	-	-	-	-	85	775	5.6	1.40	0.70
10	4	4	-	-	-	-	85	715	5.6	1.40	0.70
11	4	4	-	-	-	-	70	785	4.5	1.13	0.56
12	4	4	-	-	-	-	70	800	4.2	1.05	0.53
13	4	4	-	-	-	-	70	900	4.5	1.13	0.56

\* Çim.: Çimento, MT: Mermer Tozu, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek Fırın Cürufu, SK: Sönmemiş Kireç, S/T: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Üçüncü grup örneklerde (seri 14-25 arası) 4 birim çimento 2 birim mermer tozu ve 2 birim uçucu kül kullanılmıştır. Karışıma ilave edilen uçucu külün puzolanik özelliğinin köpük betona etkisi incelenmiştir. Bu grubun son iki serisine (24-25) sönmemiş kireç ilave edilmiştir (Çizelge 3.17).

**Çizelge 3.17** 3. grup numunelerin karışım oranları.

Seri	Çim.	MT	UK	YFC	SK	Alçı	Köp.(g/L)	Harç(g/L)	Su	S/Ç	S/T
14	4	2	2	-	-	-	80	720	3.5	0.88	0.44
15	4	2	2	-	-	-	80	720	3.6	0.90	0.45
16	4	2	2	-	-	-	80	730	4.5	1.13	0.56
17	4	2	2	-	-	-	80	752	4.0	1.00	0.50
18	4	2	2	-	-	-	80	760	4.15	1.04	0.52
19	4	2	2	-	-	-	80	770	3.5	0.88	0.44
20	4	2	2	-	-	-	80	780	4.5	1.13	0.56
21	4	2	2	-	-	-	80	780	4.2	1.05	0.53
22	4	2	2	-	-	-	80	800	4.6	1.15	0.58
23	4	2	2	-	-	-	80	810	4.0	1.00	0.50
24	4	2	2	-	0.20	-	90	690	4.0	1.00	0.49
25	4	2	2	-	0.20	-	90	715	3.0	0.75	0.37

\* Çim.: Çimento, MT: Mermer Tozu, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek Fırın Cürufu, SK: Sönmemiş Kireç, S/T: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Dördüncü grup örneklerde (seri 26-33 arası) 4 birim çimento 4 birim uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu külün oranı artırılmış ve mermer tozu karışından çıkarılmıştır. Sadece uçucu kül numunelerin, mermer tozu ile üretilen numunelerle kıyaslanması amaçlanmıştır. Bu grubun ilk iki (26-27) serisine alçı, son iki serisine ise (32-33) sönmemiş kireç ilave edilmiştir (Çizelge 3.18).

**Çizelge 3.18** 4. grup numunelerin karışım oranları.

Seri	Çim.	MT	UK	YFC	SK	Alçı	Köp.(g/L)	Harç(g/L)	Su	S/Ç	S/T
26	4	-	4	-	-	0.20	90	875	4.2	1.05	0.42
27	4	-	4	-	-	0.20	85	810	6.0	1.50	0.50
28	4	-	4	-	-	-	80	710	5.4	1.35	0.68
29	4	-	4	-	-	-	80	700	6.0	1.50	0.75
30	4	-	4	-	-	-	90	875	4.2	1.05	0.51
31	4	-	4	-	-	-	90	860	5.0	1.25	0.61
32	4	-	4	-	0.20	-	90	650	5.3	1.33	0.65
33	4	-	4	-	0.20	-	80	600	6.0	1.50	0.73

\* Çim.: Çimento, MT: Mermer Tozu, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek Fırın Cürufu, SK: Sönmemiş Kireç, S/T: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Beşinci grup örneklerde (seri 34-36 arası) 4 birim çimento 4 birim uçucu kül ve 2 birim yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun köpük beton numunelere etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır (Çizelge 3.19).

**Çizelge 3.19** 5. grup numunelerin karışım oranları.

Seri	Çim.	MT	UK	YFC	SK	Alçı	Köp.(g/L)	Harç(g/L)	Su	S/Ç	S/T
34	4	4	-	2	-	-	80	750	4.20	1.05	0.42
35	4	4	-	2	-	-	80	800	4.20	1.05	0.42
36	4	4	-	2	-	-	80	830	4.20	1.05	0.42

\* Çim.: Çimento, MT: Mermer Tozu, UK: Uçucu Kül, YFC: Yüksek Fırın Cürufu, SK: Sönmemiş Kireç, S/T: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Karışımlarda dolgu olarak mermer tozu, puzolan katkıları olarak uçucu kül ve öğütülmüş YFC farklı oranlarda kullanılmıştır.



**Resim 3.7** Kullanılmak üzere üretilen köpük.

Köpük makinesinde köpük üretimi yapılarak hazır hale getirilmiştir (Resim 3.7). Birinci aşamada sırasıyla; karışım suyu, lif katkısı, çimento, uçucu kül, mermer tozu, sönmemiş kireç kütlece oransal olarak alınmıştır. Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıları toplam bağlayıcı kütlelerinin %0.5-%1.5 oranında karışım suyuna ilave edilmiştir. Köpük betonun rötre çatlaklarını önlemek amacıyla, polipropilen lif katkısı çimentonun %0.5'i oranında karışıma ilave edilmiştir. Harcın akışkanlığı dikkate alınarak S/B (Su/Bağlayıcı) oranları 0.5 ile 0.75 arasında seçilmiştir.

İkinci aşamada belirlenen hedef taze harç yoğunluğu elde edilmesi için belirlenen yoğunlukta ve gerekli miktarda köpük miksera ilave edilerek homojen karışım sağlanıncaya kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır (Resim 3.8).



Homojen hale gelen taze harcın yoğunluğu tartılarak belirlenmiştir (Resim 3.9). Eğer yoğunluk fazla ise yeterli miktarda köpük ilavesi yapılarak tekrar karıştırma işlemi ve tartım yapılarak istenen taze beton yoğunluğu elde edilmiştir. Taze haldeki köpük beton harcı beklemeden kalıplara dökülmüştür (Resim 3.10).



**Resim 3.8** alışmada kullanılan pan tipi mikser.



**Resim 3.9** Yoğunluk kontrolü.



**Resim 3.10** Köpük beton harcının kalıplara dökülmesi.



**Resim 3.11** Köpük beton harcının etüve hazır hali.

Numuneler kalıplara döküldükten sonra önce etüv (Resim 3.12) daha sonra kalıplardan çıkarılıp (Resim 3.13) kür uygulamasına tabi tutulmuştur (Resim 3.14). Etüv ve kür süreçleri deneysel yöntemlerle belirlenmiştir. Elde edilen en iyi mukavemet ve harç gözenekli yapısının korunması amaçlanmıştır. Çökme olmayan numuneler üzerinden yorum yapılarak en uygun sıcaklık ve süre elde edilmiştir.



**Resim 3.12** Kalıpların etüve yerleştirilmesi.



**Resim 3.13** Örneklerin kalıptan çıkarılması.



**Resim 3.14** Örneklerin buhar kürüne alınması.

Buhar kr sonunda örnekler fiziksel ve mekanik testler için ayrılmıştır (Resim 3.15).



**Resim 3.15** Testler için ayrılan rnekler.

### 3.2.2 Mekanik zelliklerin Belirlenmesi

Deney rneklerinin basınç dayanımları 20 ton basınç ve 2 ton eēilme kapasitesine sahip beton presinde kırılmıştır (Resim 3.16). Yükleme hızı, saniyede 0.05-0.25 N/mm<sup>2</sup> gerilme artışı saēlayacak veya numunede yaklaşık 30 saniyede kırılma olacak şekilde ayarlanmıştır.



**Resim 3.16** rneklerin basınç presinde kırılması.

Numunenin basınç mukavemeti Eşitlik 4.1'e göre hesaplanarak bulunmuştur (TS 453).

$$\sigma = P_{\max} / F \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte;  $\sigma$  = Numunenin basınç mukavemeti, (N/mm<sup>2</sup>),  $P_{\max}$  = Kırılma anındaki kuvvet (N)  $F$  = Basınç uygulanan numune alanı (mm<sup>2</sup>)

Örneklerin kuru birim hacim ağırlık (BHA) değerleri belirlenmiştir. Boyutları ölçülerek hacimleri bulunan deney numuneleri 105°C ± 5°C sıcaklığa ayarlanmış etüve konularak değişmez kütleye gelinceye kadar kurutulmuştur. Birim hacim ağırlığı değerleri Eşitlik 4.2'ye göre hesaplanmıştır.

$$\Delta = W/V \quad (4.2)$$

Burada  $\Delta$ : BHA,  $W$ : Numune kütlesi,  $V$ : Numunenin hacmidir.

### 3.2.3 Köpük Beton Reolojisi Çalışmaları

Bu çalışmada köpük beton harçlarının dinamik viskozite değerleri Brookfield tipi viskozimetre ile ölçülmüştür (Resim 3.17). Bu tip cihazlar tork reometreleri olarak adlandırılır. Belirli hızda dönen silindirik disk sıvının dönmeye karşı gösterdiği direnç (sıvının deformasyonu için gerekli kuvvet) nedeniyle tork olarak ölçülür ve cihaz yardımıyla dinamik viskozite centiPoise (N.s/m<sup>2</sup>) değeri olarak verilir. Farklı akışkanlıktaki sıvıları doğru olarak ölçmek için doğru disk (spindle) seçimi yapmak önemlidir (Resim 3.18). Bu nedenle yapılan ön çalışmalar sonucunda en yüksek ölçüm doğruluğunu veren 3 numaralı disk deneylerde kullanılmıştır.

Brookfield tipi viskozimetre kullanılarak köpük beton harcının Bingham tipi akış özelliklerini ortaya koymak teorikte mümkün olmakla birlikte, aynı malzeme üzerinde farklı deformasyon hızlarında (rpm) ölçümler alarak değerlerin not edilmesi ölçümlerde bazı tutarsızlıklara yol açtığı gözlenmiştir. Bunun temel nedeni, harcın deformasyonu nedeniyle köpük üzerindeki kararsızlık oluşumu ve sulu harç sistemindeki bileşenlerin çökmesi olarak düşünülmektedir. Bu tip problemlerin aşılması, her farklı deformasyon hızı için taze harç hazırlanması ile mümkün olmaktadır (Resim 3.19).

Deney programında viskozite ölçümleri hazırlanan harç numuneleri dökülmeden önce planlandığı için, Bingham modelindeki plastik viskozite değerleri yerine köpük beton harcının akışkanlık özelliklerini daha basit ve hızlı bir şekilde karakterize edecek Dinamik vizkozite değerleri ölçülerek yapılmıştır.

Tüm ölçümlerde sabit deformasyon hızı (100 rpm) kullanılmış ve alınan 3 ölçümün ortalaması harç için dinamik viskozite değeri olarak not edilmiştir. 1 litrelik harç miktarlarında döküm öncesinde ölçümler alınmıştır. Sadece mermer tozunun dolgu (filler) olarak yer aldığı serilerinde yapılan ölçümler değişken su/bağlayıcı oranları ve taze harç yoğunlukları göz önüne alınarak değerlendirilmiştir. Cihaz tarafından centipoise (cP) olarak ölçülen değerler  $N.s/m^2$  birimine çevrilerek kullanılmıştır (1centipoise= 0.001  $N.s/m^2$ ).



**Resim 3.17** Viskozite ölçüm cihazı.



**Resim 3.18** Viskozite disk (spindle).

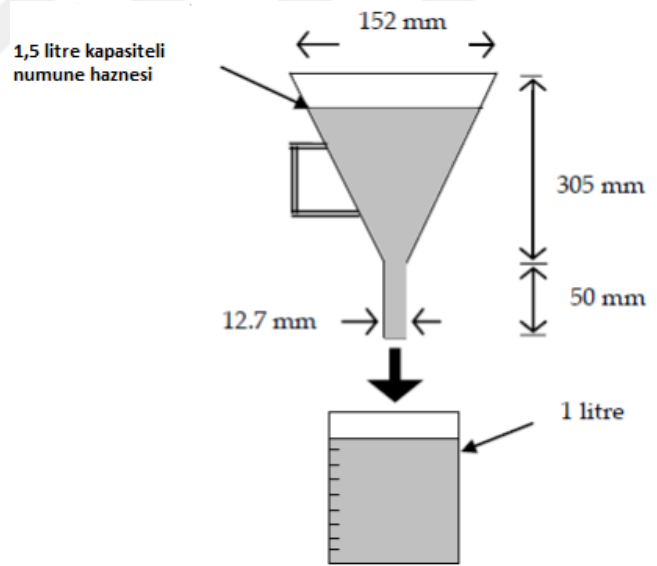


**Resim 3.19** Viskozite ölçüm örneği.

Köpük betonların akışkanlığını belirlemede kullanılan diğer yaygın bir yöntem de Marsh Konisi kullanımıdır (Resim 3.20).



**Resim 3.20** Deneyde kullanılan Marsh Konisi.



**Resim 3.21** Marsh Konisi ölçüleri.

Marsh konisi kısıtlı imkanlarla yapılan bir yöntemdir. Kesin sonuç vermez fakat hızlı ve çabuk karar vermede etkilidir. Deney ortamında özel ölçülere sahip bir koni yardımıyla üretilen harç için yorum yapmakta kullanılır (Resim 3.21).

Asıl amaç akış süresi ile katkı dozajı arasında ‘doygunluk noktası’ adı verilen katkı dozajını belirlemektir. Akış süresi gözlemlendikten sonra, eğer gerekiyorsa katkı eklenmiş veya köpük takviyesi yapılmıştır. Her harç üretiminde bu kriter dikkate alınmıştır. Doygunluk noktası uygun görülen harçların kalıba dökülmeden önceki ölçüm işlemi diyebiliriz. Bu ölçümün betonun kalıba yerleşmesinde etkin olduğu düşünülmektedir.

Bu yöntem temel olarak 1.5 litrelik döküme hazır harcın basit bir huniden 1 litrelik harç kısmının akma süresinin ölçülerek not edilmesi prensibine dayanmaktadır. Akış süresinin ölçülmesinin yanında akma davranışı da görsel olarak belirlenerek not edilir. Buna göre 1 litrelik taze harcın 1 dakikanın altında akması durumu sabit ve düzenli akış olarak değerlendirilir. Akış süreleri 1 dakikayı geçen harçlar ise engelli veya zor akış olarak not edilir. Harç akmıyorsa “akmadı” olarak not edilir.

### 3.2.4 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi

Isıl iletkenlik katsayısının ( $\lambda$ ) belirlenmesi işleminde “Heat Flow Meter, (HFM-Fox 314) cihazı kullanılmıştır (Resim 3.22). Isı iletkenlik katsayısı TS EN 12664 (2009), TS EN 12667 (2003) ve ASTM C518 (2003)’e göre belirlenmiştir.



**Resim 3.22** Deneysel olarak kullanılan Heat Flow Meter, (HFM-Fox 314) cihazı.

### 3.2.5 Köpük Beton Örneklerin Boy Değişim (Rötre) Değerlerinin Ölçülmesi

Komparatörlerin bölüntüleri genellikle 0.01 ve 0.001'i gösterecek şekilde yapılmıştır. Komparatörler kaldıraç düzeniyle çalışan ölçü aletleridir. Deney numunesinin ucuna temas eden komparatör tuşunun hareketi, kaldıraç sistem ile büyütürken boy değişiminin 0.01 veya 0.001 mm değerinde görülmesini sağlar. Komparatör kadranın çevresi 100 eşit aralıkta bölünmüştür. İbre bir tam devir yaptığında uç aşağı veya yukarı doğru 1 mm hareket eder. İbre sağa dönünce uç yukarıya, sola dönünce aşağıya doğru harekete geçer. Kadranın alt tarafında ayrıca küçük bir ibre ile 10 eşit parçaya bölünmüş bir mm göstergesi vardır. Büyük ibre hareket edince küçük ibre de harekete geçer. Büyük ibrenin bir tam devrinde, küçük ibre 1'den 2'ye gelir. Küçük ibrenin 1'den 0'a kadar hareket etmesi; yani bir tam devir yapması ile komparatör ucu 10 mm hareket eder. Komparatör kadranı çevresi 100 eşit aralığa bölünmüş olduğundan çevredeki iki çizgi arası  $1/100 = 0.01$  mm olarak elde edilir. Buna göre örneğin; ibre kadran çevresinde 15 çizgi ilerlerse, uç 0.15 mm hareket etmiş olur (Resim 3.23).



**Resim 3.23** Boy değişimi ölçümü için üretilen harç örnekleri ve ölçüm işlemi.



#### 4. BULGULAR

Toplam 5 grup halinde 36 karışımda hazırlanan örnekler üretilmiş ve örneklerin etüvde mukavemet kazanmasını takiben otoklav kürü uygulanarak; fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Basınç mukavemeti sonuçlarını beş ana grupta incelemek mümkündür. Sonuçlar üzerinde yorum yapılırken; benzer reçeteye sahip olan karışımlar ilk etapta dikkate alınacaktır.

**Çizelge 4.1** 1. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri.

Seri	Harç (g/L)	Köp.(g/L)	S/Ç	S/T	BHA Kg/m <sup>3</sup>	Bas. Day. (MPa)	TSE* 13655
1	680	80	0.75	0.50	625	2.65	1.5
2	700	80	0.75	0.50	660	2.70	1.5
3	715	80	0.88	0.58	685	2.75	1.5
4	730	80	0.71	0.48	695	3.05	1.5
5	750	80	0.69	0.46	710	3.35	1.5
6	770	80	0.78	0.52	715	3.40	1.5
7	780	80	0.86	0.58	730	3.45	1.5
8	810	80	0.75	0.50	760	3.55	1.5

TSE\* 13655, Köpük betondan mamul yerinde döküm, taşıyıcı olmayan duvar elemanları, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Birinci grup örneklerde (seri 1-8 arası), yeterli mukavemet gelişimi sağlanarak standart değerler elde edilmiştir (Çizelge 4.1).

**Çizelge 4.2** 2. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri.

Seri	Harç (g/L)	Köp.(g/L)	S/Ç	S/T	BHA Kg/m <sup>3</sup>	Bas. Day. (MPa)	TSE* 13655
9	775	85	1.40	0.70	725	1.75	1.5
10	715	85	1.40	0.70	650	1.60	1.5
11	785	70	1.13	0.56	730	2.55	1.5
12	800	70	1.05	0.53	735	2.75	1.5
13	900	70	1.13	0.56	760	2.65	1.5

TSE\* 13655, Köpük betondan mamul yerinde döküm, taşıyıcı olmayan duvar elemanları, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

İkinci grup örneklerde (seri 9-13 arası), yeterli basınç mukavemeti değerlerinin sağlandığı görülmekte olup, 1. Grup numunelere göre mukavemet değerlerinde azalma gerçekleşmiştir (Çizelge 4.2).

**Çizelge 4.3** 3. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri.

Seri	Harç (g/L)	Köp.(g/L)	S/Ç	S/T	BHA Kg/m <sup>3</sup>	Bas. Day. (MPa)	TSE* 13655
14	720	80	0.88	0.44	680	3.00	1.5
15	720	80	0.90	0.45	675	2.40	1.5
16	730	80	1.13	0.56	630	2.35	1.5
17	752	80	1.00	0.50	670	2.65	1.5
18	760	80	1.04	0.52	675	2.70	1.5
19	770	80	0.88	0.44	710	3.45	1.5
20	780	80	1.13	0.56	685	2.65	1.5
21	780	80	1.05	0.53	690	2.55	1.5
22	800	80	1.15	0.58	705	3.50	1.5
23	810	80	1.00	0.50	715	3.65	1.5
24	690	90	1.00	0.49	610	2.35	1.5
25	715	90	0.75	0.37	660	2.60	1.5

TSE\* 13655, Köpük betondan mamul yerinde döküm, taşıyıcı olmayan duvar elemanları, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Üçüncü grup örneklerde (seri 14-25 arası), standart değerlerin üzerinde mukavemet değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.3).

**Çizelge 4.4** 4. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri.

Seri	Harç (g/L)	Köp.(g/L)	S/Ç	S/T	BHA Kg/m <sup>3</sup>	Bas. Day. (MPa)	TSE* 13655
26	875	90	1.05	0.42	560	2.85	1.5
27	810	85	1.50	0.50	600	3.40	1.5
28	710	80	1.35	0.68	550	2.55	1.5
29	700	80	1.50	0.75	550	2.55	1.5
30	875	90	1.05	0.95	670	3.35	1.5
31	860	90	1.25	1.20	650	2.60	1.5
32	650	90	1.33	1.26	550	2.65	1.5
33	600	80	1.50	1.43	450	1.95	1.5

TSE\* 13655, Köpük betondan mamul yerinde döküm, taşıyıcı olmayan duvar elemanları, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Dördüncü grup örneklerde (seri 30-37 arası), standart değerlerin üzerinde basınç mukavemeti değerleri elde edilmiştir (Çizelge 4.4).

**Çizelge 4.5** 5. Grup örneklerin birim hacim ağırlık ve basınç mukavemeti değerleri.

Seri	Harç (g/L)	Köp.(g/L)	S/Ç	S/T	BHA Kg/m <sup>3</sup>	Bas. Day. (MPa)	TSE* 13655
34	750	80	1.05	0.42	680	3.85	1.5
35	800	80	1.05	0.42	705	4.25	1.5
36	830	80	1.05	0.42	750	4.35	1.5

TSE\* 13655, Köpük betondan mamul yerinde döküm, taşıyıcı olmayan duvar elemanları, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz

Beşinci grup örneklerde (seri 38-40 arası), YFC'nin karışıma ilave edilmesi ile aynı kuru yoğunluk değerleri için basınç mukavemeti değerlerinde dikkate değer artışlar gerçekleşmiştir (Çizelge 4.5).

Çalışmada kullanılan mermer tozu gözenekli olmamasına karşılık uçucu küle göre daha ince tane boyutundadır. Uçucu kül ise mermer tozuna göre daha iri tane boyutunda ve gözenekli yapıya sahiptir. Bu özellikler nedeniyle dolgu olarak sadece mermer tozu kullanılan ve sadece uçucu kül kullanılan serilerde su ihtiyacı yaklaşık aynı oranda gerçekleşmiştir.

#### **4.1 Optimum köpük yoğunluğunun (gr/L) belirlenmesi**

Seçilen köpük yoğunluğu hem taze beton özelliklerini ve hem de sertleşmiş beton özelliklerini etkilemektedir. Köpük yoğunluğunun 40 gr/L'den düşük olduğu numune serilerinde çökme gerçekleşmiştir. Ancak daha yüksek köpük yoğunluklarında (70-90 g/L) çökme gözlenmemiştir. Taze harç bileşimindeki katı tanecikler düşük yoğunluktaki köpük bünyede yerçekimi nedeniyle tutunamayarak priz başlamadan önce tabana doğru çökme eğilimi göstermeleri ile sonuçlanmaktadır. Buna karşı yüksek köpük yoğunluğu (80 g/L üzeri) sertleşmiş betonun gözenek yapısını büyütmektedir.

#### **4.2 Su/Çimento (S/Ç), Su/Toz (S/T) Oranı ve Yapı Kimyasallarının Etkisi**

Karışımlarda S/Ç oranı 0.69-1.50 oranları arasında uygulanmıştır. Su miktarı düşük seçildiğinde, karışım oldukça katı kıvamda olmakta ve köpüğü oluşturan kabarcıkların ezilmesine yol açmaktadır. Ayrıca ortamda hidrasyon için gereken su azaldığından mukavemet gelişimi olumsuz etkilendiği düşünülmektedir. S/Ç oranı 0.70-1.00 arasındaki örneklerde yeterli mukavemet değerleri elde edilmiştir. S/Ç oranı  $\geq 1.0$  olan karışımlarda mukavemet gelişiminde azalmalar gerçekleşmiştir. Özellikle S/Ç oranı: 1.0-1.50 arasında olan örneklerde mukavemet çarpıcı biçimde azalmıştır.

Köpük betonda iri taneli malzeme bulunmadığından bileşimi oluşturan malzemelerin yüzey alanlarının artması sonucu gereken karma suyu ihtiyacı artmaktadır. Harcı su/çimento oranı (S/Ç) genellikle 0.5 ile 0.6 arasındadır. Karışımdaki ince malzeme miktarı arttığında S/T oranında azalma meydana gelmektedir. S/T:0.40-1.0 aralığında uygun dayanım değerleri elde edilmiştir. S/T oranı yeterli kıvamı sağlayacak oranda seçilmesi ana tasarım kriterlerinden biri olmaktadır.

S/T oranı köpük beton üretiminde önemli bir faktördür ve S/T oranı azaldığında öngörülen bir yoğunluk için ürünün basınç dayanımında artış gerçekleşmiştir. Bunun yanı sıra, köpük beton karışımlar S/T oranına uygun su azaltıcı katkıları ilave edilerek kıvam değerleri kontrol edilebilir.

Köpük beton karışımlara su azaltıcı ya da priz hızlandırıcılar gibi kimyasal katkıları ilave edilebilir. Su azaltıcı katkıları basınç mukavemetini artırmaktadır ve büzülme çatlaklarını azaltıcı etki yapmaktadır. Tek başına ya da bir arada, sıcak su, yüksek-erken dayanıklı çimento ve priz hızlandırıcı katkı kullanımı, priz sürecini hızlandırmaktadır. Çalışmada normal akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkı kullanılmıştır. Ön deneyler yürütülerek katkıların etkileri araştırılmıştır. Buna göre optimum akışkanlaştırıcı oranı çimento miktarının %1.5 olarak elde edilmiştir. Daha yüksek oranlar kullanıldığında taze harçta ayrışma gözlenmiştir.

Yapı kimyasallarının köpük betonda kullanımı ile ilgili dikkat çekici bir özellik vardır. Normal betonlarda istenen taze beton (akışkanlık/işlenebilirlik vb) ve sertleşmiş beton (dayanım/dayanıklılık) özelliklerini sağlamak amacı ile kullanılan yapı kimyasallarının büyük çoğunluğu gözenek engelleyici (köpük kesici) özelliklere sahiptir. Bu özellikteki kimyasal katkıları köpük betonda kullanıldığında taze haldeki köpük betonun gözeneklerinin henüz priz başlamadan yok olmasına, katı tanelerin köpük karışım içinde tutunamayıp betonun çökmesi ile sonuçlanabilmektedir. Dolayısı ile kullanılacak yapı kimyasallarının köpüğün kararlılığına (stabilite) zarar vermeyecek özellikte seçilmesi gerekmektedir. Çalışmada köpüğün stabilitesine zarar vermeyen akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Normal betonda kullanılan süper akışkanlaştırıcı kullanıldığında kalıpta çökme gelişmiştir.

#### **4.3 Mineral malzemelerin taze beton ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi**

Mermer tozunun ince ve dolu yapısına karşılık, uçucu külün daha iri ancak gözenekli yapısı nedeniyle her iki karışım serilerinde S/Ç oranları yaklaşık aynı oranlarda gerçekleşmiştir. Uçucu küllü serilerde taze harç ağırlığı dikkate alındığında kuru birim ağırlık değerlerinde mermer tozu katkılı örnekler göre daha düşük değerler elde edilmiştir. Buna neden olarak uçucu külün gözenekli yapısı nedeniyle daha fazla su emdiği, kür süreci ve kuruma sonrası su kaybı nedeniyle daha düşük birim ağırlık değerleri elde edildiği değerlendirilmektedir.

Uçucu külün bir filler malzeme olarak, köpük beton içine katılması ince kuma göre hava boşlukların daha düzgün bir dağılımı elde edilmesinde yardımcı olmaktadır. Uçucu kül kuma göre inceliği nedeniyle, her bir gözeneği düzgün ve üniform kaplayarak, gözeneklerin birleşmesini engelleyip, bünyede üniform dağılmasına yardım etmektedir. Daha küçük gözenek dağılımına sahip karışımlar daha yüksek mukavemet göstermişlerdir. Yüksek köpük hacmine sahip karışımlarda kabarcıkların birleşerek daha büyük gözenekler oluşturduğu, bünyede oluşan büyük boyutlu gözenek dağılımının mukavemeti düşürdüğü görülmüştür.

Mermer tozu normalde puzolanik özelliği olmayan inert bir mineral malzemedir. Ancak ince tane boyutunda karışıma girdiğinde reaktif özellik gösterebilmekte, mukavemet gelişimine katkı sağlamaktadır. Karışıma %8'e kadar ilave edilen sönmemiş kireç priz süresini kısaltırken basınç mukavemetini artırmaktadır. Sönmemiş kirecin (CaO) sulu ortamda sönmüş kirece (Ca(OH)<sub>2</sub>) dönüşürken çıkardığı ısının hidrasyona olumlu katkı yaptığı görülmektedir.

#### **4.4 Hemikarbonat faz oluşumuna Nano kalsit ilavesinin etkisi**

Üretilen numunelerin mineralojik yapısında en dikkat çeken yapı Hemikarbonat fazının gelişimi olmuştur. Normal (PÇ) çimento hidrasyonunda gözlemlenmeyen bu fazın varlığı temel olarak karışımda bulunan çok ince boyuttaki mermer tozundan kaynaklanmaktadır. Mermer tozu teoride, kireç taşı (CaCO<sub>3</sub>) hidrasyona katkısı olmayan ve inert bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir.

Yapılan çalışma göstermiştir ki, kireçtaşı ilavesinde belirli şartlar sağlandığında (tane boyutu, yeterli alumina ve sülfat varlığı, kireçtaşı miktarı) reaktif bir bileşen olabilmektedir.

Kireçtaşı içeren çimento pastasında erken hidrasyon döneminde  $C_4AC_{0,5}H_{12}$  genel gösterimiyle ifade edilen hemikarbonat fazı oluşur. Hidrasyon sürecinin ilerlemesiyle (90 gün ve üzeri) hemikarbonat fazı  $C_4ACH_{11}$  genel gösterimiyle ifade edilen monokarbonat fazına dönüşür.

Hemihidrat oluşumunu daha iyi anlamak ve köpük betonun mukavemet gelişimine olabilecek muhtemel etkisini gözlemek için, mermer tozundan daha küçük tane boyutuna sahip kalsit ilavesi yapılarak mineralojik yapı (28 gün) ve mukavemet özelliklerine olan etkileri incelenmiştir. Referans bileşime seri 1 farklı boyutta ve sabit oranda olacak şekilde kalsit ilavesi yapılmıştır (Çizelge 4.6).

**Çizelge 4.6** Referans bileşim ve farklı boyutta kalsit ilave edilen seriler.

SN	Ç	MT	K	SU	AK	PHZ	PL	S/B	S/T	KY	HRÇ	BHA	(MPa)
1	4	2	0.2	2.70	1.5	1.5	0.5	0.68	0.46	90	770	670	2.56
2	4	2	0.2	2.70	1.5	1.5	0.5	0.68	0.46	90	800	700	2.50
3	4	2	0.2	2.75	1.5	1.5	0.5	0.69	0.46	90	715	660	2.02

\* AK, PHz, PL, S/B değerleri (%) olarak verilmiştir. BHA ise  $kg/m^3$  tür. Ç: Çimento, MT: Mermer Tozu, K: Kalsit, AK: Akışkanlaştırıcı Katkı, PHZ: Priz Hızlandırıcı Katkı, PL: Polipropilen Elyaf S/T: Su/Toz, S/Ç: Su/Çimento, KY: Köpük Yoğunluğu, HRÇ: Harç Yoğunluğu, BHA: Birim Hacim Ağırlık, MPa: Basınç Dayanımı

XRD çalışması yürütülerek ince tane boyutlu kalsit ilavelerinin neden olduğu mineralojik değişimler izlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle hemihidrat fazının şiddetindeki değişimler gözlenmeye çalışılmıştır. XRD analizlerinde fazın şiddetindeki değişimler, fazın yapı içinde bulunma oranıyla doğru orantılıdır. Bu çalışmada daha önce yapılan XRD analizlerde gözlenmeyen etrenjit fazının varlığı dikkat çekmiştir.

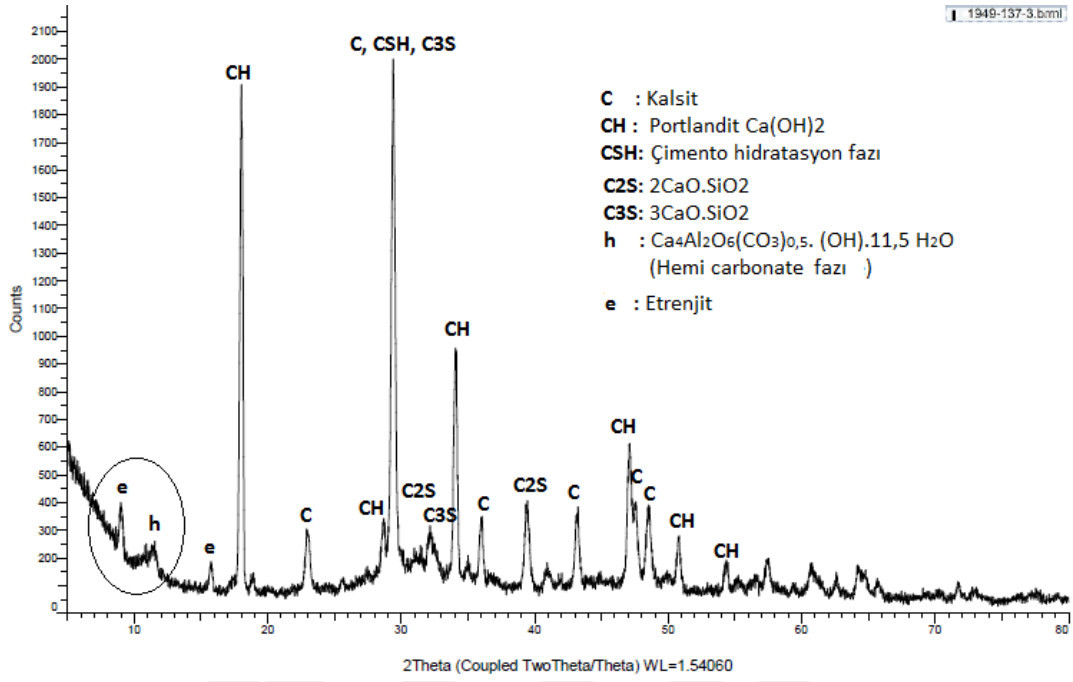
Hem referans hem de PCC kalsit içeren numunelerde etrenjit fazı gözlenmiştir. Bu davranışın numune üretim aşamasındaki mevsimsel (ortam ve su sıcaklığı, nem v.b) şartlardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Farklı boyuttaki PCC kalsit ilavesinin hemihidrat fazının şiddetinde olan etkisi incelendiğinde az da olsa farklar olduğu görülmektedir (Çizelge 4.7).

**Çizelge 4.7** Referans bileşim ve farklı boyutta kalsit ilave edilen seriler.

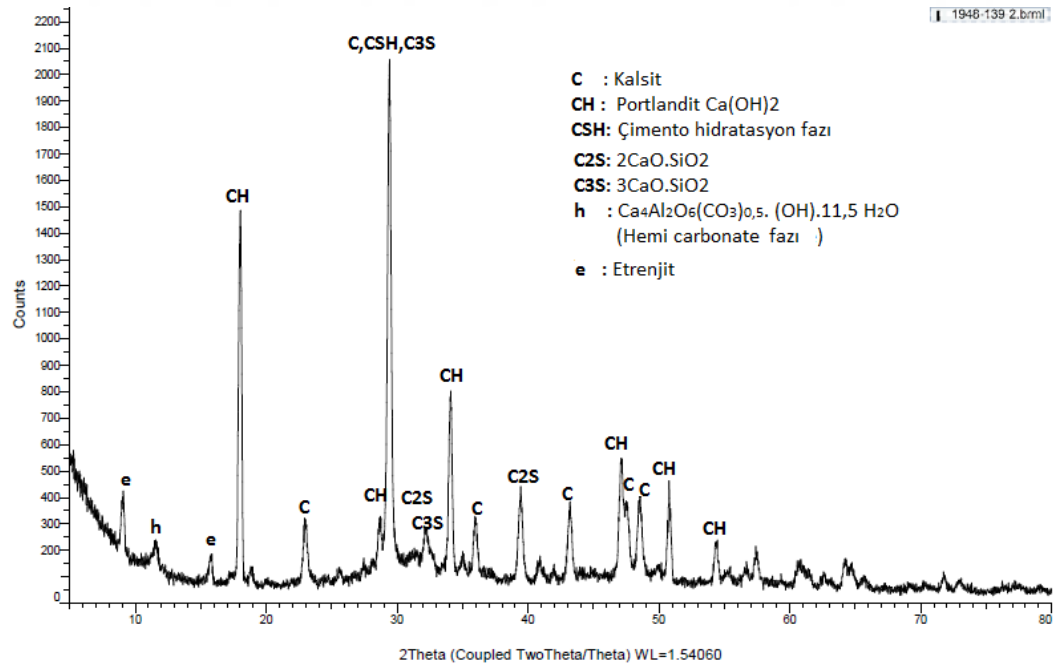
Numune	Şiddet (cps)	
	Etrenjit	Hemihidrat
1	400	220
2	450	240
3	300	280

XRD analizleri ve fazlar incelendiğinde referans karışıma yapılan daha küçük tane boyutlu kalsit ilavesi ile seri 2 kodlu numunede etrenjit ve hemihidrat fazının yüksekliğinde azda olsa bir artış gözlenmiştir (Şekil 4.2). Bu davranış azalan kalsit tane boyutunun daha kolay çözünerek yeni faz oluşumunu kolaylaştırdığını göstermektedir. Ancak daha küçük tane boyutuna sahip 3. no'lu numunede etrenjit ve hemihidrat fazının yüksekliğinde azalma gözlemlenmiştir (Şekil 4.3).

Beklenenin tersine olan bu sonuç çok küçük tane boyutlu kalsit tanelerinin topaklanmasından (aglomerasyonundan) kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Daha küçük kalsit tane boyutunun sisteme ilavesinde eğer dispersiyon şartları tam olarak sağlanabilirse, hemihidrat fazının miktarının daha da artırılmasının mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.1 Seri 1 kodlu numunelerin XRD analizleri.



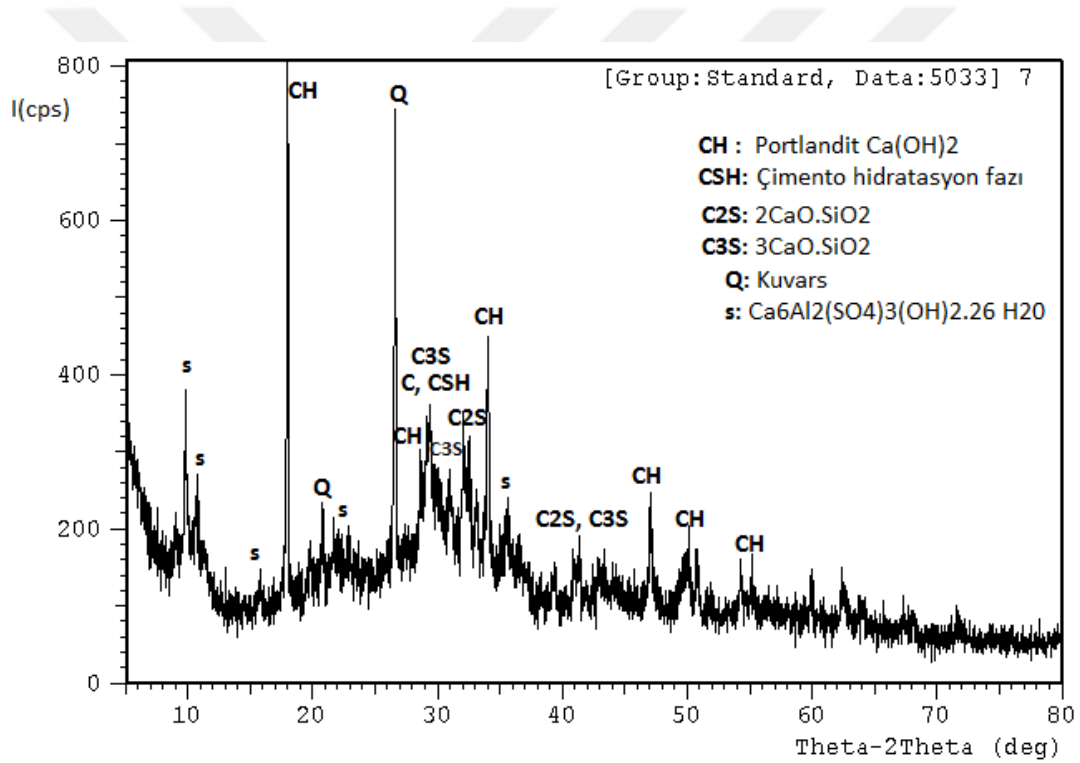
Şekil 4.2 Seri 2 kodlu numunelerin XRD analizleri.





XRD analizinde yapı içerisinde kristal faz oluşumlarının oldukça sınırlı olduğu gözlenmiştir.  $2\theta=20-35^\circ$  arasında gözlenen “hump” diye tabir edilen görünüm yapının oldukça amorf olduğunu göstermektedir. Uçucu külden gelmesi muhtemel sülfatların neticesine bağlı olarak yapı içerisinde hidrate kalsiyum alumino sülfat fazının varlığı dikkat çekmiştir.

Mermer tozu katkılı 12. seri örnekten alınan XRD analizinde geleneksel çimento hidratasyon ürünleri ile kullanılan mermer tozuna bağlı olarak kalsit fazı gözlenmiştir (Şekil 4.4). Daha önceki çalışmalarda da gözlenen hemi karbonat fazının varlığı da tespiti edilmiştir.



Şekil 4.5 Dolgu olarak uçucu kül kullanılan 32 nolu serinin XRD grafiği.

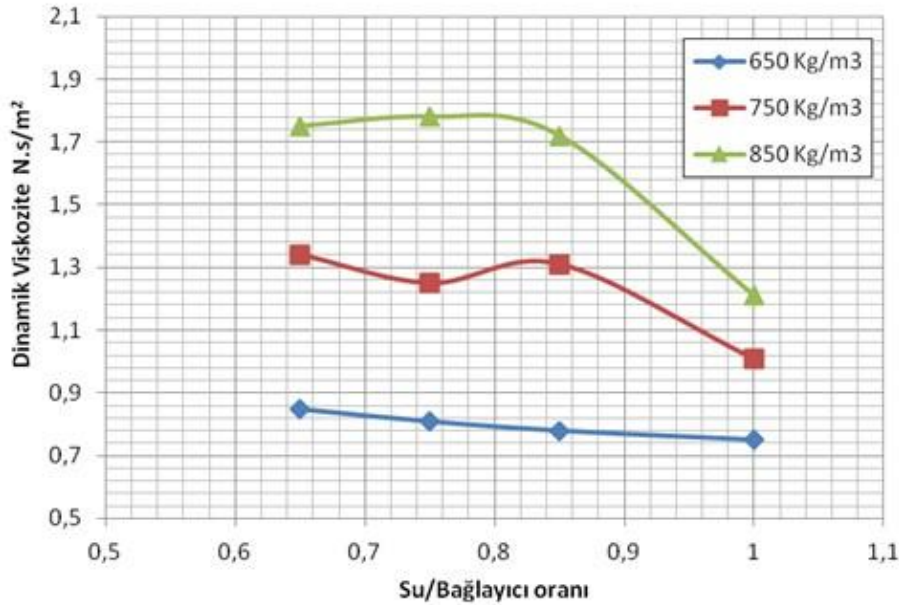
Ç:MT ve Ç:UK oranı 1:1 olan 12 ve 32 numaralı numunelerin XRD analizleri elde edilen mukavemet ve nihai ürün birim hacim ağırlık değerleri ile birlikte değerlendirilmiştir (Şekil 4.5).

Sadece uçucu kül içeren numunelerin sadece mermer tozu içeren numunelere göre daha fazla CSH jel yapısı içerdiği, XRD analizinde  $2q=20-35^\circ$  arasında gözlenen “hump” bölgesinin varlığından anlaşılmaktadır.

CSH jel yapısındaki bu artış, uçucu kül içeren numunenin nihai birim hacim ağırlığının ( $550 \text{ kg/m}^3$ ) mermer tozu içeren numunenin birim hacim ağırlığından ( $735 \text{ kg/m}^3$ ) çok daha düşük olmasına rağmen benzer mukavemet değerleri elde edilmiştir. Sadece uçucu kül ve mermer tozu içeren numunelerin mukavemet değerleri sırasıyla 2.55 MPa ve 2.75 MPa olarak ölçülmüştür.

#### 4.5 Taze beton viskozite değerleri

Çalışmada Brookfield viskozimetresi için yapılan ölçümler aynı anda Marsh konisi için de yapılmış ve değerlendirilmiştir. Su/bağlayıcı oranı, taze harç yoğunluğu ile dinamik viskozite arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir (Şekil 4.6). Kullanılan köpük yoğunluğu 80 ile 90 g/L arasında seçilmiştir. Taze harç yoğunluğu 600- 900 g/L arasında belirlenmiştir.

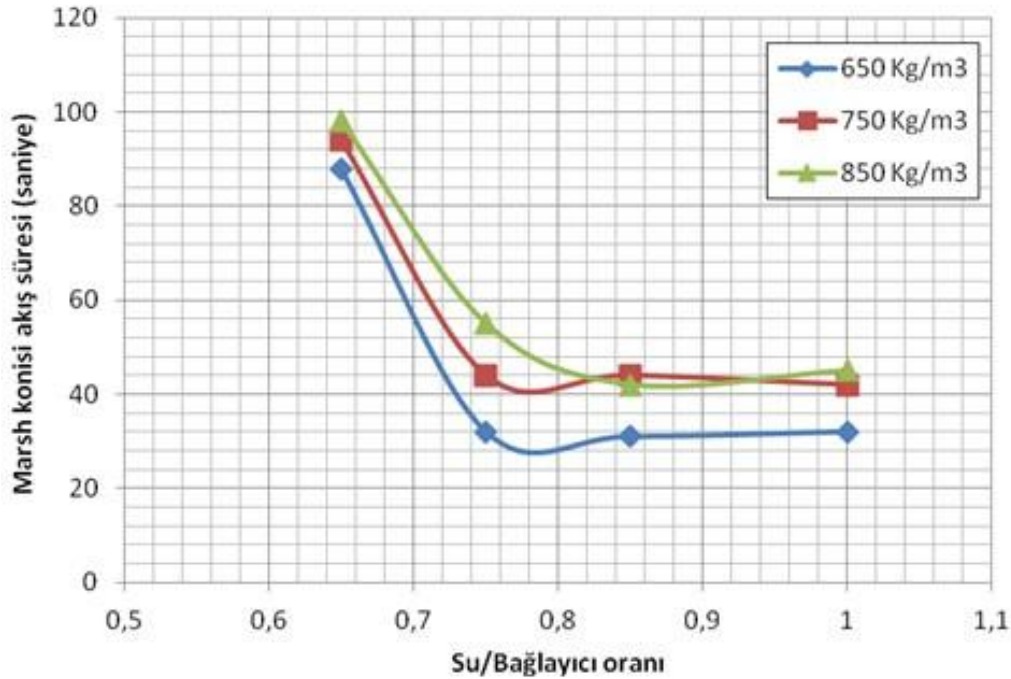


Şekil 4.6 Su/bağlayıcı oranı ile taze harç yoğunluğuna bağlı viskozite değişimleri.

Harçların dinamik viskoziteleri artan su/bağlayıcı oranı ile azalmaktadır. Harç yoğunluğu arttıkça viskozite değerleri de artmıştır. Karışımlardaki su oranı arttıkça taneler arasındaki iç sürtünme azaldığından harçlar daha akışkan hale gelmektedir.

Düşük yoğunluğa ( $650 \text{ kg/m}^3$ ) sahip serilerde artan su/bağlayıcı oranında düzenli azalan viskozite değerleri ölçülürken, yüksek yoğunluğa sahip harçlarda genelde bir azalma gözlenirse de değerlerde bazı dalgalanmalar gözlenmiştir. Bunun temel nedeninin mermer kesim çamurunu çöktürme için kullanılan Poliakrilamid (PAA) esaslı flokulant kullanımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Marsh konisiyle yapılan akış ölçümlerinde su/bağlayıcı oranı 0.45 ve 0.55 olan serilerde taze harç ağırlığından bağımsız olarak akış olmadığı gözlenmiştir. Ancak  $600 \text{ g/m}^3$  harç yoğunluğundaki serilerde kısıtlı bir akış gözlenmiştir. Harç numunelerinin ölçülen akış süre değişimleri gösterilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Marsh konisi akış süreleri değişimleri.

Marsh konisi akış süreleri karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranının 0.65'den 0.75'e değişmesiyle akış sürelerinde ani bir azalma olduğu ve su miktarının artmasıyla (0.85 ve 1.0) akış sürelerinde hissedilen bir değişme olmadığı gözlemlenmiştir. Akış süresindeki ani düşme temelde karışımdaki su miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.75'den daha büyük harç karışımlarında akış süresi 1 dakikanın altında gerçekleşmiştir, bu nedenle sabit ve düzenli akan harçlar olarak değerlendirilmiştir.

Farklı mermer tozu numuneleriyle yapılan köpük beton çalışmalarında daha düşük su/bağlayıcı oranlarında 1 dakikanın altında sabit ve düzenli akış süreleri elde edildiği görülmektedir.

#### **4.6 Kür süresi ve koşullarının incelenmesi**

Kullanılan köpük kimyasalı üretim, karıştırma ve pompalama sırasında ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal etkilere karşı hava kabarcıklarını muhafaza edebilen ve betonun priz süresince bu özelliklerini koruyabilen bir kimyasal bileşime sahip olmalıdır. Eğer priz sürecinde kabarcıkların yapısı kararsız hale gelirse, çökme olabilir ve beton yoğunluğunda artış gerçekleşir. Priz süresince kür uygulamaları önemlidir.

Puzolan katkıları genel olarak priz süresini uzattıkları için uygun tipte priz hızlandırıcı katkıları kullanılması priz sürecini kısaltarak betonun homojenliğini korumada katkı sağlayabilecektir. Köpük beton karışımlara priz hızlandırıcı kimyasal katkıları ilave edilebilir. Çalışmada normal priz hızlandırıcı katkı çimentonun %1.5 oranında kullanılmıştır. Katkı priz süresini kısaltarak katı tanelerin çökmesi engellenmiştir. Yürütülen ön deneylerde priz hızlandırıcı katkı kullanılmayan karışımlarda çökme gözlenmiştir.

Deneysel çalışmada örneklerin priz sürecinde 20-35 °C sıcaklık aralığında bekletilmesinin uygun olduğu belirlenmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda priz süresinin uzadığı ve taze bünyede katı tanelerin ayrışarak çökme eğilim gösterdikleri belirlenmiştir. Buna karşı 35 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kalıpların üst yüzeylerinde kabarma (genleşme) meydana gelmiştir. Bunun sıcaklık artışı ile birlikte priz süreci devam ederken bünyedeki köpük hücrelerinin genişerek hacim artışına neden oldukları düşünülmektedir. Prizini tamamlayan örneklere 50 °C sıcaklıkta ve 6 saat atmosferik buhar kürü uygulanmıştır. Daha sonra örnekler ortam koşullarında 28 gün bekletilmiştir.

#### 4.7 Köpük Beton Isı İletkenlik Değerleri

Örneklerin ısı iletkenlik katsayısı değerlerini belirlemek amacı ile iki farklı yoğunluk ve iki farklı karışım olmak üzere 4 farklı seride plaka (30x30x5cm) köpük beton örnekler üretilmiştir (Resim 4.1). Örnekler 24 saat süre ile 105 °C'deki etüvde kurutulduktan sonra birim ağırlıkları hesaplanmış ve bu şartlarda ısı iletim testi uygulanmıştır.



**Resim 4.1** Plaka numuneler (30x30x5cm).

**Çizelge 4.8** Plaka örneklerin (30x30x5cm) ısı iletkenlik değerleri.

Seri	Çimento	UK	MT	Köpük Ağ. (g/L)	Birim Ağırlık (t/m <sup>3</sup> )	Isı iletkenlik (W/mK)	
						Deney örnekleri	Ticari Gazbeton*
1	4	2	2	80	700	0.16	0.21
2	4	2	2	80	600	0.13	0.20
3	4	-	4	80	700	0.19	0.22
4	4	-	4	80	600	0.14	0.19

Ticari Gazbeton\*: TSE 825, Köpük Beton; UK: Uçucu Kül, MT: Mermer Tozu

Isı iletkenlik değerleri ölçülen plaka numuneler ticari gazbeton (TS 825) ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.8). Aynı birim ağırlık değerleri için köpük beton örneklerin benzeri ürünlere göre daha düşük iletkenlik sergiledikleri, köpük beton standartlarına uyum sağladığı belirlenmiştir. Üretilen uçucu kül katkılı köpük beton örneklerin mermer tozu katkılı örneklerle göre daha düşük iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bunun başlıca nedeni olarak uçucu külün kendi morfolojik yapısındaki gözenekli bünyeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4.8 Köpük Beton Örneklerin Boy Değişim (Rötre) Değerleri

Köpük beton harçlarının boy değişim özelliklerini incelemek üzere prizmatik harç çubukları üretilmiştir. Harç çubuklarının kalıp içindeki boyları (25x25x285) mm'dir. Mermer tozu ve uçucu külün köpük beton bünyede rötre davranışlarını incelemek amacı ile harç çubukları seçilen 3 farklı karışım için hazırlanmıştır (Çizelge 4.9). Kalıplara dökülerek köpük beton üretim prosesi uygulanmıştır. Her bir seriden üç adet harç çubuğu üretilerek test uygulanmış ve ortalama boy değişim (rötre) değerleri sunulmuştur. Testlerde boy ölçüm komparatörü kullanılmıştır.

**Çizelge 4.9** Boy değişimi testi yürütülen karışımlar.

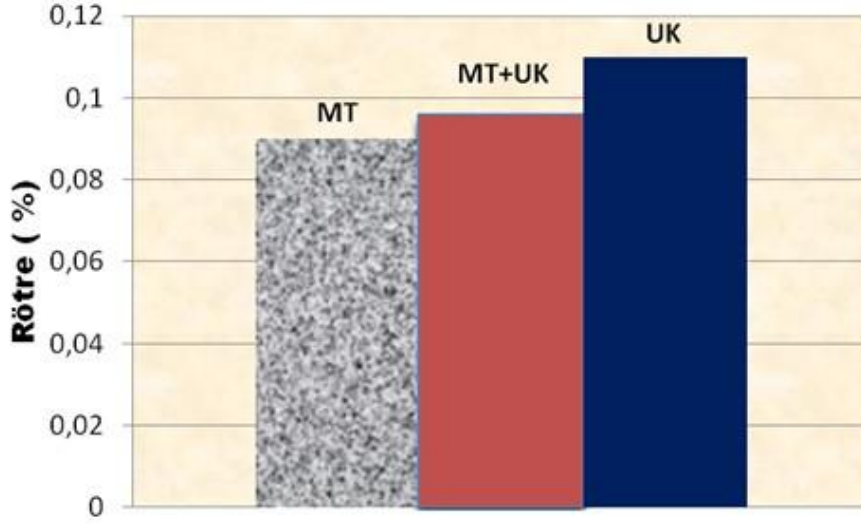
Seri no	Ç	UK	MT	Köpük	Harç	S/Ç	S/T	BHA
1	4	4	-	80	800	1.5	0.5	710
2	4	2	2	80	800	1.25	0.55	715
3	4	-	4	80	800	1	0.58	720

\* Köpük ve harç ağırlığı g/L olarak verilmiştir. BHA ise Kg/m<sup>3</sup> olarak ifade edilmektedir. Ç: Çimento, UK: Uçucu Kül, MT: Mermer Tozu, S/Ç: Su/Çimento, S/T: Su/Toz, BHA: Birim Hacim Ağırlık

Boy değişimleri Eşitlik 4.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçlar grafik olarak sunulmuştur (Şekil 4.8).

$$\Delta L = \frac{(L_2 - L_1)}{L_d} \times 100 \quad (4.4)$$

$\Delta L$ : Rötre değeri (%),  $L_1$ : Suda 72 saat bekletildikten sonra ölçülen numune boyu.  $L_2$ : 28 gün sonunda ölçülen numune boyu.  $L_d$ : Numunenin başlangıçtaki (orijinal) boyu.



Şekil 4.8 Üç farklı karışımda hazırlanan örneklerin boy değişim (rötre) değerleri.

Örnekler 72 saat suda bekletildikten sonra kalıplarından çıkarılmıştır. Daha sonra nem kabiniinde (23 °C sıcaklık ve %50 nispi nem oranında) 28 gün bekletilmiştir (ASTM C 157). Literatürde kuruma küçülmesi değerleri birim ağırlık değerlerine göre %0.3 ile %0.07 arasında değişmektedir. Buna göre örneklerin kuruma küçülmesi değerleri literatür değerlerin altında kalmaktadır. Köpük betonun birim ağırlık değerlerine göre kuruma küçülmesi değerleri Çizelge 4.10'da verilmiştir.

Çizelge 4.10 Köpük betonun tipik özellikleri.

Kuru Bir. Ağı. (kg/m <sup>3</sup> )	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı iletim değeri (3% nemli)	Kuruma küçülmesi* (%)	Kuruma küçülmesi** (%)
400	0.5-1.0	0.10	0.30-0.35	
600	1.0-1.5	0.11	0.22-0.25	
800	1.5-2.0	0.17-0.23	0.20-0.22	0.09-0.11
1000	2.5-3.0	0.23-0.30	0.15-0.18	
1200	4.5-5.5	0.38-0.42	0.09-0.11	
1400	6.0-8.0	0.50-0.55	0.07-0.09	
1600	7.5-10	0.62-0.66	0.06-0.07	

\* Deneysel Numuneleri \*\*Literatür değerler (Newman *et al.* 2003).



## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Köpük beton üretim sürecinde en önemli süreçlerden biri priz süreci tamamlanmadan kalıpta çökme gelişmesi ile karşılaşılmasıdır. Bu nedenle uygun özelliklerde priz hızlandırıcı katkı kullanım önemli olmaktadır. Beton ne kadar hızlı priz alırsa o derece çökme az olacaktır. Köpüğün stabil yapısını koruma süresinden dolayı sıcak ve nemli ortamda hızlı priz alan betonlarda çökme olayına az daha rastlanmıştır.

Taze harç bileşimindeki katı tanecikler düşük yoğunluktaki köpük bünyede yerçekimi nedeniyle tutunamayarak priz başlamadan önce tabana doğru çökme eğilimi göstermeleri ile sonuçlanmaktadır.

Karışımındaki köpük miktarının artması ile köpük betonun yoğunluğunda azalma gerçekleşir ve köpük miktarı ile yoğunluk arasında ters üstel bir ilişki vardır. Karışımındaki köpük miktarını değiştirerek örneklerin yoğunluğunu ayarlamak en uygun yoldur.

Beton içerisindeki gözenek yapısının büyümesi yalıtım konusunda olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Su miktarı düşük seçildiğinde, karışım oldukça katı kıvamda olmakta ve köpüğü oluşturan kabarcıkların ezilmesine yol açmaktadır. Ayrıca ortamda hidrasyon için gereken su azaldığından mukavemet gelişimi olumsuz etkilenmiştir. S/Ç oranı 0.70–1.00 oranı arasındaki örneklerde yeterli mukavemet değerleri elde edilmiştir. Karışımındaki ince malzeme miktarı arttığında S/T oranında azalma meydana gelmektedir. S/T oranı: 0.40-1.0 aralığında uygun dayanım değerleri elde edilmiştir. S/T oranı yeterli kıvamı sağlayacak oranda seçilmesi ana tasarım kriterlerinden biri olmaktadır.

Dolgu malzemesi olarak uçucu kül-mermer tozu kullanılan serilerde (seri 14-25); sadece mermer tozu kullanılan serilere göre (seri 1-13) mukavemette artış gerçekleşmiştir.

Uçucu küllü karışımlar aynı yoğunluklardaki mermer tozu katkılı karışımlara göre daha yüksek mukavemet değerleri göstermişlerdir. Bu etki literatürdeki çalışmalarla uyum göstermektedir. Uçucu külün mermer tozu ile kısmen veya tamamen ikame edilmesiyle, (19-22-23 numaralı serilerde) köpük betonun mukavemeti önemli ölçüde artış göstermiştir. Bunun nedeni olarak uçucu külün puzolanik özelliğinin etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Birinci grup örneklerde (seri 1-8 arası), mermer tozuna göre karışımdaki çimento oranının (Ç:2; MT:1) yüksek olması ile yeterli hidratasyon reaksiyonlarının gerçekleşerek mukavemet gelişimine katkı sağladığı düşünülmektedir.

MT ve UK oranlarının 1/1 oranında olduğu İkinci Grup örneklerde (seri 9-13 arası), yeterli basınç mukavemeti değerlerinin sağlandığı, ancak Birinci Grup numunelere kıyasla mukavemet değerlerinde azalma görülmüştür. Buna mermer tozunun harç bünyesinde inert olarak davranış göstermesi ve ince tane boyutunda mermer tozu taneciklerini bağlamak için çimento hamurunun yeterli miktarda olmamasının etkili olduğu düşünülmektedir.

Üçüncü grup örneklerde (seri 14-25 arası), karışıma ilave edilen uçucu külün puzolanik davranışının etkili olduğu yeterli miktarda C-S-H fazlarının geliştiği düşünülmektedir. İkinci grup numunelerden daha düşük birim hacim ağırlığına sahip oldukları ve mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Dördüncü grup örneklerde (seri 26-33 arası), harçta yer alan yüksek orandaki uçucu külün ilerleyen kür sürecinde puzolanik reaksiyon göstererek mukavemet değerlerinde artış sağladığı düşünülmektedir. Beşinci grup örneklerde (seri 34-36 arası), YFC'nin köpük beton karışımında kullanılan uçucu küle göre daha iyi puzolanik reaktivite göstererek ikincil reaksiyon aşamasında daha fazla C-S-H fazları ürettiği değerlendirilmektedir.

Lif katılmayan örneklerde rötre çatlakları gelişmiştir. Karışıma ilave edilen polipropilen lif katkısı rötre çatlaklarının gelişimini engelleyici etki yapmıştır. Sadece uçucu kül içeren numunelerin mukavemet değeri 2.55 MPa ve sadece mermer tozu içeren numunelerin mukavemet değeri 2.75 MPa olarak ölçülmüştür.

Uçucu kül içeren numunede gözlenen hidrate olmuş kalsiyum aluminosulfat fazının da mukavemet gelişimine katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Düşük yoğunluğa ( $650 \text{ kg/m}^3$ ) sahip serilerde artan su/bağlayıcı oranında düzenli azalan viskozite değerleri ölçülürken, yüksek yoğunluğa sahip harçlarda genelde bir azalma gözlenirse de değerlerde bazı dalgalanmalar gözlenmiştir. Bunun temel nedeninin mermer kesim çamurunu çöktürme için kullanılan Poliakrilamid (PAA) esaslı flokulant kullanımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

En küçük rötre değeri mermer tozu kullanılan örneklerde %0.09 (1. seri) gerçekleşirken, en büyük rötre değeri filler olarak tamamı uçucu kül kullanılan seride (3. seri) %0.11 olarak belirlenmiştir. Buna neden olarak; uçucu külün, mermer tozuna göre büzülmeye karşı daha dirençsiz olduğu, uçucu külün aynı kıvam ve stabilite için daha büyük oranda S/Ç oranı gerektirmesi ve daha büyük hacimde büzümeye eğilimine sahip uçucu küllü harcın aynı birim ağırlık değeri için daha az köpük hacmi gerektirmesidir.

Bilindiği gibi sulu haldeki mermer kesim çamurundan su ve mermer tozlarını ayırmak için flokulantlar kullanılmaktadır. Bunlar mermer tozunun içinde kalabilmektedir. Tekrar sulu sistem içinde dağıtılan mermer tozları flokulant etkisi ile topaklanma eğilimi içinde olabileceği ve bunun viskozite değerlerinde dalgalanmalara neden olduğu düşünülmektedir. Kesim işleminden sonra atığı susuzlaştırmak için kullanılan flokulantlar topaklanmayı arttırarak akış süresi uzattığı gözlemlenmiştir.

Üretilen uçucu kül katkılı köpük beton örneklerin mermer tozu katkılı örneklere göre daha düşük iletkenlik değerlerine sahip oldukları belirlenmiştir. Bunu başlıca nedeni olarak uçucu külün kendi morfolojik yapısındaki gözeneklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

- Ağar, E. (2007). Seyitömer termik santral uçucu küllerinin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Akbulut, H. ve Gürer, C. (2003). Mermer Atıklarının Çevresel Etkileri ve Yol Katmanlarında Tekrar Kullanım imkanları, Türkiye IV. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Afyon, 10-15.
- Albayrak, H.F. (1985). Beton ve deneyleri el kitabı, D.S.İ, Ankara, 20-27.
- Aldridge, D. (2005). Introduction to foamed concrete, UK, 1-14.
- Altınççek, A. (2001). Mermer ocağı açımında temel alınacak temel bölgesel ve temel kriterler, Türkiye III. Mermer Sempozyumu, Afyon, 235-247.
- Alyamaç, K. E. ve İnce, R. (2007). Karo mozaik döşeme kaplama plak üretiminde atık mermer çamurunun kullanılabilirliği, 7. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 437-446.
- Anonim, (2008). ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete, **1**: 4-7.
- ASTM C 618, (2000). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standart, 2-4.
- Banfill, P.F.G. (2006) Rheology Of Fresh Cement And Concrete, **61**: 130.
- Baradan, B. (2012). Beton, 1. Baskı, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bilensoy, M. (2010). Mermer Fabrikaları Toz Atıklarının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Bilim, C. (2006). Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği., Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Bilim, C., Atış, C. D. (2011). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu İçeren Harçların Aşınma ve Mukavemet Özellikleri, Politeknik Dergisi, **2**: 101-107.
- Bing, C., Zhen, W. and Ning, L. (2012). Experimental research on properties of high strength foamed concrete, **8**: 113.

- Brady, K .C. and Jones, M .R (2001). Specification for Foamed Concrete, UK, A5-A6.
- Byun, KJ., Song HW. and Park SS. (1998). Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent, **3**: 98.
- Collins, F. and Sanjayan, J.G. (2001). Microcracking and Strength Development of Alkali Activated Slag Concrete, Cement and Concrete Composites, **5**: 345–352.
- Çil, (2003). Uçucu Küllerin Beton Yapımında Kullanımı, 56. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, 10-15.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş. ve Kuru, M. (2015). Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım Ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal beton kongresi, Antalya, 93-102.
- Demir, İ. (2014). Köpük Betonda Rötire Çatlaklarının Engellenmesi Hakkında Teknik Rapor.
- Dickson, S. (2015). Alkali-silica reaction mitigation using high volume class C flyash, UK, 3-4.
- Doğulu, S. (1998). Effect of Fineness of Ground Granulated Blast-Furnace Slags on Their Cementitious Properties. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Durack, J.M. and Weiqing, L. (1998). The properties of foamed air cured fly ash based concrete for masonry production. Proceedings of 5th Australian Masonry Conference, Australian, 129-138.
- Erdemiş, S. (2001). Termik Santral Artık Uçucu Küllerinin Sinterleme Davranışına B203'ün Etkisi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y. (2007). Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi. METU Press, Ankara, 30-35.
- Erdoğan, T. (2003). Beton Kitabı, Metu yayınları, Ankara, 26-36.
- Erdoğan, T. Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741.
- Erdoğan, T. (1995). Öğürülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve kullanımı, Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanılması sempozyumu bildiriler kitabı, TMMOB İnşaat mühendisleri odası, Ankara, **1**: 1-14.
- Erdoğan, T. (2007). Beton Kitabı, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 188-189.
- Gelim, K.A.K. (2011). Mechanical And Physical Properties of Fly Ash Foamed Concrete, Master Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, University Tun Hussein Onn, Malaysia, 4-7.

- Göлтаş Çimento A.Ş., (2014). Aylık Çimento Analiz Raporu.
- Güler, G. (2005). Uçucu Küllerin Özellikleri Ve Kullanım Alanları, Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, İzmir.
- Gündeşli, U. (2008). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Habert, G., d’Espinoze de Lacaille JB. and Roussel N. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *J Clean Prod* **11**: 1229.
- Hunaiti, YM. (1997). Strength of composite sections with foamed and lightweight aggregate concrete, **2**: 58–61.
- Jones, MR, Mc Carthy, A. (2005) (a). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete, **84**: 1398–1409.
- Jones, MR, McCarthy, A. (2005) (b). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, **57**: 21–31.
- Jones, M.R. and McCarthy, A. (2006). Heat of hydration in foamed concrete: Effect of mix constituents and plastic density. *Cement and Concrete Research*, **6**: 1032-1041.
- Kalay, E. (2010). Sıkıştırılmış yüksek plastisiteli kil zemin stabilizasyonunda pomza, mermer tozu ve kirecin kullanılması, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kearsley, EP. (1997). Just foamed concrete, Specialist techniques and materials for construction, London, 227–231.
- Kearsley, E.P. and Wainwright, P.J. (2001) (a). Porosity and permeability of foamed concrete. *Cement and Concrete Research*, **5**: 805-812.
- Khayat, K.H. and Assaad, J. (2002). Air-void stability in self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal*, **4**: 408-416.
- Kılıç, H. (2010). Mermer atıklarının otomotiv fren balata üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik ve Bilim Dergisi* **1**: 12-14.
- Kondo, R. (1962). Discussions of Blast Furnace Slags and Slag Cements, Proc. 4th Intern. Symp. On the Chemistry of Cement, **2**: 973-975.

- Kılıç, Ö. (2015). Çöktürülmüş Kalsiyum Karbonat Üretimi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **1**: 79-85.
- Kun, N. (2000). Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi, Mermerciler Odası, İzmir, 149.
- Kutchko, B. G. and Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel*, **17**: 2537-2544.
- Laukaitis, A., Zurauskas, R. and Keriene, J. (2005). The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, **27**: 7-41.
- Maziah, M. (2011). Development of foamed concrete, enabling and supporting design. a thesis presented in application for the degree of doctor of philosophy, Division of Civil Engineering, University of Dundee, Scotland.
- McCarthy, A. (2004). Thermally insulating foundations and ground slabs for sustainable housing using foamed concrete, PhD Thesis, University of Dundee, Scotland.
- Ulusoy, M. (2014). MTA Doğal Kaynaklar Ve Ekonomi Bülteni, **17**: 27-33.
- Mohammed, J.H. and Hamad, A.J. (2014). A classification of lightweight concrete: materials, properties and application review, *International Journal of Advanced Engineering Applications*, **7**: 52-57.
- Mostafa, NY. (2005). Influence of air-cooled slag on physicochemical properties of autoclaved aerated concrete, **35**: 1349.
- Narayanan, N. and Ramamurthy, K. (2000). Structure and Properties of Aerated Concrete, **22**: 321 – 329.
- Nambiar, EKK. and Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete, **28**: 475.
- Nambiar, EKK. and K. Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete, **37**: 221–230.
- Nehdi, M., Djebbar, Y. and Khan, A. (2001). Neural network model for preformed foam cellular concrete, **98**: 402–9.
- Newman, J. and Choo, B.S. (2003). *Advanced Concrete Technology Processes*, Butterworth-Heinemann, An Imprint of Elsevier, UK, 5-9.
- Öztürk, M. (2009). Mermer Üretimi ve Çevre Kirliliği araştırması, **1**:12.
- Zhihua, P., Hengzhi, L. and Weiqing, L.. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures. *Construction and Building Materials*, UK, 256–261.

- Panesar, D.K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, UK, 575–584.
- Papayianni, I, Milud, IA. (2005). Production of foamed concrete with high calcium fly ash, Ireland, 12-22.
- Perez, L. Cortez, L. (1997). Potential for the use of pyrolytic tar from baggase in industry. *Biomass Bioenergy*, **12**: 363.
- Pollard, TJS., Montgomery, MD. and Sollar, JC. (1992). Organic Compounds in The Cement-Based Stabilization/ Solidification of Hazardous Mixed Waste Mechanistic and Process Consideration. Imperial College Center for Toxic Waste Management, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. and Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete, **6**: 388.
- Ramamurthy, E.K. and Nambiar, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete *Indu Siva RanjaniCement & Concrete Composites*, **31**: 388–396.
- Regen, P.E. and Arasteh, A.R. (1990). Lightweight aggregate foamed concrete. *Structural Engineer*, **9**: 167-173.
- Rizzo, G. and D'Agostino, F. (2007). Problems of soil and groundwater pollution in the disposal of marble slurries in NW Sicily, Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Processi e dei Materiali, Universita` di Palermo, Viale delle Scienze, Palermo, Italy, 929-935.
- Rudnai, G. (1963). Lightweight concretes, Budapest **3**:16.
- Sayın, Z. E., Aksoy, U. (2012). Mermer Toz Artıkları Özelliklerinin İyileştirilmesine Falcon Gravite Konsantratörün Etkisi, *Madencilik Dergisi*, Ankara, 23-29.
- Short, A, Kinniburgh, W. (1963). Lightweight concrete, Asia Publishing House.
- Şener, M. (2012). Mekanik Aktivasyonun Jipsin Isıl Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Şentürk, A., Gündüz, U., Tosun, İ.Y. and Sarıışık, A. (1996). Mermer teknolojisi, Tuğra Ofset, Isparta.
- Şimşek, O. (2007). Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 17-19.
- Terzi, S. ve Karaşahin, M. (2003). Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonu Karışımında Filler Malzeme Olarak Kullanımı, *T.M.M.O.B. İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, **2**: 2003-2903.



- TMMOB, (2017). Makina Mühendisleri Odası Oda Raporu, Türkiye’de Termik Termik Santraller. Ankara.
- Tokyay, M. ve Erdoğan, K. (1998). Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu. TÇMB Yayınları, Ankara, 98.
- Topgül, S. S. (2016). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tosun, İ.Y. (1996). Mermer Toz Atıklarının Temizlenmesi, Doğal Yapı ve Kaplama Taşı Mermer Teknolojisi Dergisi, **1**: 15–18.
- TS EN 197-1, (2012). Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri
- TS EN 450-1, (2013). Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- TS 13655, (2015). Kâgir Birimler - Özellikler - Köpük Beton Kâgir Kırım, TSE, Ankara.
- Tumluer, G. (2006). Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana, 173.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., (2003). Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, Ankara, 16-27.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2009). Türkiyedeki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, Ankara 32-45.
- Türkiye İstatistik Kurumu, (2014). Termik Santral Su, Atık Su ve Atık İstatistikleri.
- Uddin, N., Fouad, F., Vaidya, U., Khotpal, A. and Serrano-Perez, J. (2006). Structural characterization of hybrid fiber reinforced polymer (FRP)–autoclave aerated concrete (AAC) panels, **9**: 981.
- Valore, RC. (1954). Cellular concrete part 1 composition and methods of production, **50**: 773.
- Visagie, M. and Kearsley, E.P. (2002). Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters, **101**: 8-14.
- Wan, H., Shui, Z. ve Lin, Z. (2004). Analysis of geometric characteristics of GGBS particles and their influences on cement properties, Cement and Concrete Research, **34**: 133-137.

- Wang, W. (2010). The study of mix design, density and strength of cellular concrete.
- Wee, T., Babu, D.S., Tamilselvan, T. and Lim, H. (2006). Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties. *ACI Materials Journal*, **103**: 45-52.
- Xuemei, C., Yun, Y., Yuanzheng, L., Zhihua, H. (2014). Utilization of circulating fluidized bed fly ash for the preparation of foam concrete, *Construction and Building Materials*, **54**: 137–146.
- Yamamoto, M., Honda, Y., Ogawa, A. and Rokugo, K. (1999). Fiber reinforced foamed mortar with multiple cracks in flexure. International RILEM workshop on high performance fiber reinforced cementitious composites in structural applications, Japan, 75–82.
- Yazıcı, H. (2004). Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Zollo, R. F., and Hays, C. D. (1998). Engineering Material Properties of a Fiber-Reinforced Cellular Concrete, *ACI Materials Journal*, UK, 631-635.

## İnternet Kaynakları

- 1) <http://www.heris.com.tr/>, 20/12/2018
- 2) <https://www.dostkimya.com/>, 20/12/2018



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Volkan ATABEY  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara / 02.08.1987  
Yabancı Dili : İngilizce  
İletişim (Telefon/e-posta) :0507 513 35 35 / volkanatabey@gmail.com

### Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Balıkesir Ticaret Odası Lisesi, (2001-2004)  
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yapı Öğretmenliği,  
(2007-2014)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, İş Güvenliği, (2014-2016)  
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri  
Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı,  
(2014-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :  
Afyonkarahisar Belediyesi (2015)  
Mutay Enerji Sistemleri San.Tic.Ltd.Şti. (2017)

Yayınları (SCI ve diğer) :

Demir İ., Başpınar M. S., Kahraman E., **Atabey V.**, ‘Foam Concrete Production with a Fly Ash Addition’ ICOEST 2015 International Conference on Environmental Science and Technology September 09-13, 2015 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

Demir İ., Başpınar M. S., Kahraman E., **Atabey V.**, ‘Microstructural Evaluation of Foam Concrete Made From Waste Marble Powder’ The Proceedings of the 3rd International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition PPM 2017