

HAFIF YAPI BLOKLARI ÜRETİMİNDE  
UÇUCU KÜLÜN KİREÇ VE ÇİMENTO İLE  
BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÖKHAN GÖRHAN

Danışman  
Doç. Dr. İSMAİL DEMİR

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2006

T.C.  
AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF YAPI BLOKLARI ÜRETİMİNDE  
UÇUCU KÜLÜN KİREÇ VE ÇİMENTO İLE  
BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

GÖKHAN GÖRHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı  
Danışman  
Doç. Dr. İSMAİL DEMİR

AFYON  
2006

Gökhan GÖRHAN'nın yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "HAFİF YAPI BLOKLARI ÜRETİMİNDE UÇUCU KÜLÜN KİREÇ VE ÇİMENTO İLE BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI." başlıklı bu çalışma, lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

... / ... / ....

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL  
(Başkan)

Jüri Üyesi : Doç. Dr. İsmail DEMİR  
(Danışman)

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .....Gün  
ve .....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### HAFİF YAPI BLOKLARI ÜRETİMİNDE UÇUCU KÜLÜN KİREÇ VE ÇİMENTO İLE BİRLİKTE KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Gökhan GÖRHAN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail DEMİR

Türkiyede kurulu olan 15 adet termik santral bulunmakta ve yılda yaklaşık 55 milyon ton linyit kömürü yakılmaktadır. Yakılan kömürden yaklaşık 13 milyon ton/yıl uçucu kül atık olarak doğal çevreye bırakılmaktadır. Çok geniş depolama alanlarında biriken atık malzeme görüntü ve çevre kirliliğine yol açmakta, doğal çevreyi işgal etmektedir. Uçucu külün çok az miktarı çimento üretiminde ve beton üretiminde agrega ikamesi olarak ya da katkı olarak kullanılabilir.

Ucuz maliyetli, çevre dostu ve istenen mekanik özellikleri sağlayan yapı malzemesi üretimi günümüzde malzeme bilimi ile ilgili araştırma yapan araştırmacıların temel hedefi olmuştur.

Deneysel çalışmada uçucu kül ana materyal olarak kullanılmıştır. Çalışmada çimento ve kireç kullanılarak hafif yapı blokları üretimi amaçlanmıştır. Çimento – kireç bağlayıcılı olarak hafif beton blok deney örnekleri üretilmiştir. Farklı karışım oranlarında deney örnekleri üretilerek bunlar üzerinde optimumizasyon çalışması yürütülmüştür. Optimum kür süresini belirlemek amacı ile örneklere normal koşullarda su kürü ve basınçlı buhar kürü olmak üzere iki farklı kür işlemi uygulanmıştır. Endüstriyel üretim için uygun kür şartları belirlenmiştir.



Örneklerin birim ağırlık, görünür yoğunluk, gözeneklilik, su emme, donma tesirlerine dayanıklılık ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak ana malzeme olan uçucu kül bir atık malzemedir ve çalışmanın esas önemi bu atığın geri dönüşümü üzerine kurulmuştur. Ekonomik şartlarda uçucu külden hafif yapı blokları üretilmesi ile doğal tarım alanlarının bozulması, görüntü kirliliği ve doğal çevreye verdiği muhtemel zararlar engellenmiş olacak ve bir atık olan uçucu külün geri dönüşümü sağlanmış olacaktır.

**2006, 108 sayfa.**

**Anahtar Kelimeler:** Uçucu kül, Çimento, Kireç, Hafif yapı bloğu.

## **ABSTRACT**

Ms.Sc.

AN INVESTIGATION ON THE USE OF FLY ASH FOR THE PRODUCTION  
LIGHTWEIGHT BUILDING BLOCKS WITH LIME AND CEMENT

Gökhan GÖRHAN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

Supervisor: Doç.Dr. İsmail DEMİR

Turkey has 15 thermal power station establishments and 55 million ton lignite is burned every year in these stations. Annually 13 million tones of fly ash are to come off to the environment as a waste material. Land filling of these wastes engage large areas and cause environmental problems. Only very small amount of fly ash is utilized in cement manufacture and used as a fine aggregate addition in concrete production.

Production of construction materials which have low cost, environmentally friendly and sufficient mechanical properties is the main aim of the researchers who makes material researches in this field.

Fly ash will be used as a main raw material in experimental studies. Production of solid and vertically perforated light weight block samples will be produced. Optimal mix ratios of cement-lime ratios will be determined as a binder.

Different curing conditions will be applied for finding out the suitable curing conditions such as water curing, and autoclaved. Curing conditions for the industrial applications will be determined. Technical properties of the samples

were measured such as porosity, water absorption, compressive strength and freeze thaw resistance.

The main importance of this project is to recycling of waste fly ash as a main material. As a result of this project, light weight construction blocks will be produced in economic way, deterioration of the agricultural soils is prevented, environmental problems of fly ash land filling is minimized by recycling of the fly ash.

**2006, 108 pages.**

**Key Words :** Fly ash, Cement, Lime, Lightweight block.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
1. GİRİŞ .....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	5
3. UÇUCU KÜL.....	18
3.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	20
3.2 Uçucu Küllerin Özellikleri.....	22
3.2.1 Kimyasal Özellikler.....	22
3.2.2 Minerolojik Bileşim.....	24
3.2.3 Morfolojik Özellikler.....	26
4. ÇİMENTO.....	31
4.1 Çimentoda Bulunan Diğer Maddeler.....	38
4.2 Çimentonun Karmaşık Bileşenleri.....	38
4.3 Çimento Çeşitleri.....	40
4.4 Bağlayıcı Maddenin Bileşenleri.....	41
4.4.1 Bağlayıcı Maddelerin Elemanları.....	41
5. KİREÇ.....	43
5.1 Kirecin Sınıflandırılması.....	46
5.1.1. Yapılarda Kullanılan Söndürülmemiş Kireçler.....	47
5.1.2. Yapılarda Kullanılan Söndürülmüş Kireçler.....	47
5.2 Kirecin Hammaddeleri.....	48
5.2.1 Kalker (Kireçtaşı).....	48
5.2.2 Dolomitik Kireçtaşı.....	48
5.3 Kireç Çeşitleri.....	49
5.3.1 Kireç (Hava Kireci).....	49
5.3.2 Su Kireci.....	50

6. KİMYASAL KATKILAR.....	51
6.1 Akışkanlaştırıcı Katkılar.....	55
6.2 Hava Sürükleyici Katkılar.....	58
7. PUZOLANLAR.....	59
8. MATERYAL ve METOT.....	62
8.1 Kullanılan Malzemeler.....	62
8.1.1 Uçucu Kül.....	62
8.1.1.1 Kimyasal Özellikler.....	62
8.1.1.2 Mineralojik Özellikler.....	63
8.1.1.3 Morfolojik Özellikler.....	63
8.1.2 Çimento.....	64
8.1.3 Kireç.....	65
8.1.4 Akışkanlaştırıcı Katkı.....	65
8.1.5 Hava Sürükleyici Katkı.....	66
8.2 Metot.....	68
8.2.1 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	72
8.2.1.1 Su Emme.....	72
8.2.1.2 Porozite.....	73
8.2.1.3 Bulk Yoğunluk.....	73
8.2.1.4 Birim Hacim Ağırlık.....	74
8.2.1.5 Görünür Yoğunluk.....	74
8.2.2 Donma-Çözünme Deneyinin Uygulanması.....	74
8.2.3 Basınç Mukavemet Testi.....	75
9. BULGULAR.....	76
9.1 %25 Kireç bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (1., 2. ve 3. karışımlar).....	78
9.2 %30 Kireç bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (4., 5. ve 6. karışımlar).....	82
9.3 %25 Çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (7., 8. ve 9. karışımlar).....	87
9.4 %30 Çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (10., 11. ve 12. karışımlar).....	90
9.5 %20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (13., 14. ve 15. karışımlar).....	94
10. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	99
11. SONUÇ.....	103
KAYNAKLAR.....	104
TEŞEKKÜR	
ÖZGEÇMİŞ	

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\lambda$	Isı iletkenlik değeri,
Sa	Ağırlıkça su emme,
P	Porozite,
Bd	Bulk yoğunluk,
Dh	Birim hacim ağırlık,
Gr.Y.	Görünür yoğunluk,
Fb	Basınç mukavemeti,
$\sigma_{\text{Basınç}}$	Basınç gerilmesi,
$\sigma_{\text{çekme}}$	Çekme gerilmesi.

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
UK	Uçucu Kül,
STS	Seyitömer Termik Santrali,
PÇ	Portland Çimentosu,
TK	Türkiye Karayolları,
DSİ	Devlet Su İşleri,
ASTM	American Society Testing for Materials,
TS 500	Türk Standartları Enstitüsü, 500 numaralı standardı.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı.....	30
4.1	Çimento bileşenlerine göre dayanım mukavemeti.....	34
8.1	Seytömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı .....	63
8.2	Hidrolik el presi .....	69
8.3	Örnek numune.....	70
8.4	Örnek numune.....	70
8.5	Etüv .....	70
8.6	Otoklav .....	71
8.7	Derin dondurucu .....	71
8.8	Pres .....	72
9.1	% 25 Kireç bağlayıcılı karışımların porozite değerleri .....	78
9.2	% 25 Kireç bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri .....	79
9.3	% 25 Kireç bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.....	80
9.4	Donma-çözünme testi sonundaki ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.....	81
9.5	Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.....	81
9.6	1. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	82
9.7	2. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	82
9.8	3. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	82
9.9	% 30 Kireç bağlayıcılı karışımların porozite değerleri .....	83
9.10	% 30 Kireç bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri .....	83
9.11	% 30 Kireç bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.....	84
9.12	Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri .....	85
9.13	Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.....	85
9.14	4. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	86
9.15	5. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	86
9.16	6. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	86
9.17	% 25 Çimento bağlayıcılı karışımların porozite değerleri .....	87

9.18	% 25 Çimento bağlayıcı karışımların yoğunluk değerleri .....	88
9.19	% 25 Çimento bağlayıcı karışımların basınç mukavemet değerleri .....	88
9.20	Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri .....	89
9.21	Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.....	89
9.22	7. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	90
9.23	8. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	90
9.24	9. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	90
9.25	% 30 Çimento bağlayıcı karışımların porozite değerleri .....	91
9.26	% 30 Çimento bağlayıcı karışımların yoğunluk değerleri .....	92
9.27	% 30 Çimento bağlayıcı karışımların basınç mukavemet değerleri .....	92
9.28	Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri .....	93
9.29	Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.....	93
9.30	10. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	94
9.31	11. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	94
9.32	12. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	94
9.33	%20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcı karışımların porozite değerleri .....	95
9.34	%20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcı karışımların yoğunluk değerleri .....	96
9.35	%20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcı karışımların basınç mukavemet değerleri .....	96
9.36	%20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcı karışımların donma-çözünme testi sonundaki ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri .....	97
9.37	Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.....	97
9.38	13. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	97
9.39	14. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	98
9.40	15. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri .....	98



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller.....	2
3.1 UK ile ilgili Türk Standartları.....	19
4.1 Çimento ana bileşenlerinin özellikleri.....	34
5.1 Kireç özellikleri .....	43
5.2 Kirecin kimyasal özellikleri.....	47
5.3 Kirecin kimyasal özellikleri.....	48
6.1 Kimyasal katkı tipleri .....	54
7.1 Puzolanların çeşitleri .....	60
8.1 Seytömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları .....	62
8.2 STS Uçucu külünün lazer tane boyutu analizi.....	64
8.3 CEM II/B 42,5R portland kompoze çimentosu özellikleri.....	65
8.4 Akışkanlaştırıcıların teknik özellikleri ve kullanım alanları .....	66
8.5 Hava sürükleyici katkının teknik özellikleri ve kullanım alanları .....	66
8.6 Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım oranları .....	68
9.1 Üretilen karışımların fiziksel özellikleri.....	76
9.2 Üretilen karışımların basınç mukavemet değerleri .....	77
9.3 Karışım oranları (1., 2. ve 3. karışım) .....	78
9.4 Karışım oranları (4., 5. ve 6. karışım) .....	83
9.5 Karışım oranları (7., 8. ve 9. karışım) .....	87
9.6 Karışım oranları (10., 11 ve 12. karışım) .....	91
9.7 Karışım oranları (13., 14. ve 15. karışım) .....	95
10.1 Bazı malzemelerin ısı iletkenliği değerleri.....	102

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel gelişim her ülkede güç üretimi ve kullanımıyla doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden endüstriyel gelişimde çevre kirliliğini beraberinde getirir. Termik santrallerde yakılan kömürden elde edilen uçucu külün etkili kullanımı ve konsantrasyonu için dünya çapında çalışmalar yürütülmektedir (Rao ve Rao 2006).

Endüstrinin talepleri ve yerli enerji sonuçlarına göre gelecek yıllarda görülmemiş ölçekte artacak olan katı kömür yakıtlarından büyük miktarlarda uçucu külün üretimi gerçekleşecektir (2010 yılının sonuna kadar  $800 \times 10^6$  ton). Bununla beraber uçucu kül sadece çevre kirliliğini ortadan kaldırmak için kullanılmamalı ve değerli bir kaynak olarak da ele alınması gerekmektedir.

Yeni uçucu kül araştırmaları içerisinde, düşük enerji içeren yeni tip çimentoların sentezlenmesi için bir hammadde olarak uçucu külün kullanılabilirliği üzerine odaklanan araştırmalar mevcuttur (Goni et al. 2000).

Ülkemizde artan enerji ihtiyacı kömür ile çalışan termik santrallerin yaygınlaşmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu santraller genellikle diğer alanlarda kullanım imkanı bulunmayan düşük kalorili kömür yataklarının yakınına kurulmakta ve her biri önemli çevre sorunlarına yol açmaktadır. Bu sorunları atmosfere bırakılan gazlardan kaynaklanan hava kirliliği ve atık sahalarında depolanan kömür yanma ürünlerinin yol açtığı toprak kirliliği olarak sıralamak mümkündür (Yazıcı 2005).

Türkiye’de elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir

atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül (UK) adı verilmektedir. Bu işlem esnasında daha iri taneli olan ve baca gazları ile birlikte atmosfere sürüklenemeyerek kazan tabanına düşen küllere de taban külü denilmektedir.

Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 adet termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Çizelge 1.1’de verilmiştir.

Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi; Çatalağzı, Çolakoğlu ve Sugözü-İskenderun termik santrali haricindeki bütün santraller, linyit kömürü ile çalışmaktadır. Türkiye’de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl UK elde edilmektedir. Bu miktar, A.B.D.’de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan’da 50 milyon ton/yıl dolayındadır (Aruntaş 2006).

Çizelge 1.1 Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller (Aruntaş 2006).

No	Santral Adı	Yakıt Cinsi	Kurulu Güç (MW)	Bulunduğu İl
1	Afşin-Elbistan A	Linyit	1355	Kahramanmaraş
2	Afşin-Elbistan B	Linyit	1440	Kahramanmaraş
3	Çan	Linyit	320	Çanakkale
4	Çatalağzı	Taşkömürü	300	Zonguldak
5	Çayırhan Park	Linyit	620	Ankara
6	Çolakoğlu 2	Taşkömürü	190	Kocaeli
7	Kangal	Linyit	457	Sivas
8	Kemerköy	Linyit	630	Muğla
9	Orhaneli	Linyit	210	Bursa
10	Seyitömer	Linyit	600	Kütahya
11	Soma A-B	Linyit	1034	Manisa
12	Sugözü-İskenderun	İthal Kömür	1210	Adana
13	Tunçbilek A-B	Linyit	429	Kütahya
14	Yatağan	Linyit	630	Muğla
15	Yeniköy	Linyit	420	Muğla

Türkiye'nin hemen her bölgesinde linyit yataklarına rastlanmaktadır. Bilinen linyit yataklarının en önemlilerini; Afşin-Elbistan, Muğla, Soma, Tunçbilek, Seyitömer, Beypazarı ve Sivas havzaları oluşturmaktadır. Türkiye’nin toplam linyit rezervleri 8,4 milyar tondur. Yıllık linyit üretimi 60-65 milyon ton civarındadır. Türkiye

linyit rezervleri bakımından dünyada yedinci ve üretim sıralamasında ise altıncı durumdadır (DPT 2440, 1996).

Çok geniş miktarlarda depolama alanlarında biriken atık malzeme; tarım alanları, su kaynakları ve doğal çevreye önemli zararlar vermektedir. Uçucu külün çok az miktarı çimento üretiminde ve beton üretiminde agreganın yerine yada katkı olarak kullanılabilir. Uçucu külün çevreye duyarlı ve ekonomik şartlarda kullanılması konusunda günümüzde araştırma çalışmaları yoğun biçimde yapılmaktadır.

Ucuz maliyetli, çevre dostu ve istenen mekanik özellikleri sağlayan yapı malzemesi üretimi günümüzde malzeme bilimi ile ilgili araştırma yapan araştırmacıların temel hedefi olmuştur.

Kömürün termik santralde yakılması sonucu ortaya çıkan, yanmayan mineral içerikli malzemenin (külün) yaklaşık % 80'i fırından çıkan uçucu gazlarla fırın dışına taşınır (uçucu kül). Geri kalan % 20'lik kısmı ise toprak halinde yanma sisteminin altında toplanır (taban külü). Elektrostatik tutucularla (filtreler) külün atmosfere karışması engellenir. Filtrelerle tutulan bu malzemeye uçucu kül adı verilir. Halen Türkiye'deki termik santrallerde ortaya çıkan uçucu külün % l'inden daha azı inşaat uygulamalarında kullanılabilir (Demir 2005).

Türkiye'de şu anda faaliyet gösteren termik santrallerin tükettiği kömür miktarı, 55,800 ton/yıl iken; planlanan santrallerin faaliyete geçmesiyle toplam kömür tüketimi yaklaşık olarak 174,917 ton/yıl olacağı tahmin edilmektedir (DPT 2440, 1996).

2020 yılına kadar termik santrallerde yıllık 50 milyon ton atık külün ortaya çıkması beklenmektedir (Tütünlü ve Atalay 2001).

Bununla birlikte bütün dünyada bir yılda üretilen toplam UK'ün ancak % 25'den daha azı değerlendirilmektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika'da üretilen toplam

UK'ün % 95'den fazlası, İngiltere'de ise yaklaşık % 50'si kullanılmaktadır. Diğer taraftan büyük miktarlarda UK üretilen A.B.D. ve Çin'de sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 40 oranında UK kullanıldığı görülmektedir.

1990 yılı verilerine göre Türkiye'de UK kullanım oranı, % 1'den daha azdır. Son yıllara ait yeni veriler ise elde edilememiştir.

UK'lerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan UK'lerin biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. UK'lerin neden olduğu çevre problemleri arasında tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Rüzgar erozyonu ve tozlanma, UK'lerin havuzlarda çökeltilmesi veya ıslatılarak taşınması sayesinde önlenebilmektedir. Yukarıda sayılan sorunların çözümlenmesi, UK'lerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir.

UK'lerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bundan başka UK; Kimya, seramik, cam, cam-seramik, döküm-metal sanayii, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi ve maden ocaklarında filler olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Aruntaş 2006).

Bu bilgiler ışığında; termik santrallerin artmasıyla birlikte uçucu kül miktarının da artacağına hiç şüphe yoktur. Bu sebepten dolayı termik santral atığı olan uçucu küllerin yapı sektöründe ve diğer alanlarda kullanılabilirliğinin araştırılması büyük önem kazanmaktadır.

## 2. GENEL BİLGİLER

Uçucu küller (UK) betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidrasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler. UK'ler elektrik üreten termik santrallerden elde edilir.

Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen UK'ler, bacanın üst kısmında elektrofiltreler veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar. Küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 µm mertebesindedir (Topçu ve Canbaz 2001).

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelir. Silindire sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir.

Diğer kullanım alanları arasında: beton ve asfalt yollarda, yol temel tabakalarında filler olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokların, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir (Türker vd. 2003).

Uçucu Küller, zemin problemlerini iyileştirmek için doğal zemine ve uçucu küle bağlı olarak ürün verimliliğini geliştirmek için kullanılabilir. Uçucu kül özellikle hava ile temas etmeyen topraklarda; B, Mo, Se ve Al gibi elementleri toplama eğilimi göstermektedir. Bu elementlerin toplanması ürün alanlarında zehir seviyesinde önemli oranda azalmalar gerçekleştirerek insan ve hayvan sağlığına önemli katkı yaparlar (Sharma ve Kalra 2006).

Uçucu külün yolda tatbiki ile ilgili yapılan bir çalışmada ise; 5 farklı kimyasal katkı kullanılmış ve bunun sonunda yolda kullanılan uçucu kül-kireç karışımına

katkılarının olumlu etkiler yaptığı ve erken yaşlarda dayanımını oldukça yükselttiği bununla birlikte optimum sonucu %1,5-2,5'lük katkı oranlarının verdiği belirtilmiştir (Jiang ve Zhao 2005).

Yapılan bir çalışmada da; uçucu küllerin kompozitlerin mekanik özelliklerine kullanılan bağlayıcının davranışı etkisinin incelenmesi amacıyla, kloroplen kauçuk ve uçucu kül kullanılarak test edilmiş ve %1'lik bağlayıcı olarak uçucu kül kullanılarak kompozit bir malzeme üretilebilmiştir (Alkadasi et al. 2006).

Başka bir kompozit malzeme üretiminde ise; farklı uçucu kül ağırlık yüzdelerine sahip epoksi reçine kompoziti yoğunluk, sertlik ve elektriksel özellikleri santrifüj kuvveti altında hazırlanarak elde edilmiş ve uçucu külün ağırlık yüzdesi artırılarak, malzemenin alternatif iletkenliğini ve izolatör sabitliği artırılmıştır (Cand ve Jain 2006).

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur.

İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır.

Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik yani bağlayıcılık özelliği gösterirler.

Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme

gerektirmeden kullanılabilir. Gerektiğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da arttırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir.

Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımını hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur.

Ayrıca, kullanıcı ürettiği yeni ürünlerde veya uygulamalarında çeşitli teknik avantajlar elde eder. Bütün bu olumlu hususlara rağmen, kullanılarak değerlendirilen uçucu kül miktarları santrallerde elde edilen miktarların küçük bir yüzdesini geçememekte olup, dünya ortalaması olarak %15 civarında rakamlar verilmektedir.

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin ABD. de ilk kullanım 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verilmiş ve Türk Standardları Enstitüsü, uçucu küller (TS 639, 1975) ve uçucu küllü çimento (TS 640, 1992) standartlarını hazırlayarak yayınlamıştır.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullanmıştır.

Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımını bu tür uygulamalarla sınırlı kalmış, kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilenin %1'ine bile ulaşamamıştır.

Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupadan uyarlanan yeni çimento ve beton standartları çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır (Türker vd. 2003).



Yapılan bir çalışmada; yüksek oranda uçucu küllü çimento pastası farklı oranlarda hazırlanan; uçucu kül, çimento, kireç, silis dumanı ve kimyasal katkıları yapılarak fiziksel mekanik ve durabilite özellikleri 0, 100 ve 200 mm slump değerlerinde incelenmiş ve geleneksel malzemeden daha iyi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir (Doven ve Pekrioglu 2005).

UK'ler beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak ya da betonda kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da değerlendirilebilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. UK'lerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. UK'ler daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar.

Araştırmalar ağırlıkça % 20 oranında UK kullanılmasının beton basınç dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bunun yanında UK kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte, prizi geciktirmektedir. Küçük danelerden oluştuğu için UK katkılı beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. UK katkılı betonun hidrasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur.

UK'ler küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su-çimento oranı ile istenilen işlenebilirliği sağlarlar. UK'ler sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar, su geçirimsizliğini azaltır. UK'ler toprak stabilizasyonu, gaz beton üretimi, hafif agrega ve tuğla üretiminde kullanılabilirler. UK'lü betonlarda kür sıcaklığının artırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur.

Kür sıcaklığı 20 °C iken 28. günden sonra, kür sıcaklığı 40 °C iken 7. günden sonra UK'ün puzolanik reaksiyona başladığı görülmüştür. UK ve portland çimentosu ile

Üretilen harçlarda basınç dayanımı düşmektedir. Bu harçlarda yüksek miktarlarda UK kullanıldığında priz sürelerinde gecikme olmakta ve büzülme oranı artmaktadır.

UK ile yapılan bir çalışmada, P 32.5 imentosu, Orhaneli termik santrali külü ve akışkanlaştırıcı kullanarak çeşitli karışımlar hazırlanmış ve sonuçta % 20 UK kullanıldığında kontrol betonuna yakın basınç dayanımları elde edilmiş ve UK ile birlikte akışkanlaştırıcı da kullanıldığında birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiş, akışkanlaştırıcı kullanılmadığında birim ağırlıklar artmıştır.

Bir başka çalışmada, Afşin-Elbistan termik santrali UK' kullanılmış ve % 15 civarında UK'n imento yerine kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

Ayrıca UK'l harçların ısı yalıtımı özelikleri incelenmiş ve UK'e % 10 oranında katılacak imento, kireç veya imento + kireç bağlayıcılarından biri ile yalıtım amaçlı sıvalar yapılabileceği gibi ayrıca UK'n sandviç dolgu duvarlarda dolgu malzemesi olarak kullanılabilenine belirtilmiştir.

UK'l betonların donma-çözülme deneyleri sonunda kayıpların daha az olduğu, betona katkı olarak katılması durumunda basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir.

Baraj gibi kütle betonu dökülen yapılarda hidratasyon ısısı düşük imento ve geçirimsiz betonların tercih edilmesi ve UK imento yerine kullanılması hidratasyon ısısını ve betonun kompasitesini iyileştirmesi nedeni ile DSİ ve TK gibi kuruluşlar UK'l betonun kullanılmasına öncülük etmişlerdir.

Farklı elektrik santrallerinden alınan UK'lerle yapılan bir çalışmada, UK'lerin kimyasal, minerolojik yapıları ile hidratasyon ve puzolanik reaksiyonlarının oluşumu ve hızları bakımından birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir.

UK'lerin kimyasal yapılarına göre sınıflandırılması bazı UK'lerin birden fazla sınıfın özelliklerine sahip olması veya bir sınıf oluşturabilecek kadar değişik karakteristiklere sahip olması nedeni ile uygun değildir. UK imento üretimi

sirasında katılması durumunda ise çimentonun öğütülme işlemi kolaylaştırmakta ve öğütülme süresi kısaltmakta yani daha az enerji ile daha dayanımlı çimento elde edilmektedir.

Yüksek dayanımlı betonlarda çimento yerine % 25 oranında UK kullanılması ile basınç dayanımları ve elastisite modülleri düşmekte, çekme ve eğilme dayanımları artmaktadır. Aynı zamanda yüzeysel aşınma artmakta ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sülfürik asit hariç artmaktadır. Sıcaklık artışı ile yüksek oranda UK katılmış betonlarda elastisite modülleri ve basınç dayanımları azalmaktadır. Düşük işlenebilirliği olan betonlarda UK çimento oranının 0.5 ve üzerine çıkması da basınç dayanımını arttırmaktadır. Çökmesiz ve akışkanlaştırıcı katılmış UK/çimento oranı 0.75 olan betonların dayanıklılığı dış yüzey uygulamaları için yeterlidir. UK'lü betonlar, 325-400 dozaj ve UK/çimento oranı 0.75 civarında olması halinde beton yapılarda yeterli dayanım, dayanıklılık ve yüzey uygulamaları için uygundur.

Yapılan bir çalışmada UK, çimento üretimi sırasında % 7.5 oranında kullanılmasının betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği belirtilmektedir. Klor geçirgenliği, aşınma dayanımı, donma çözülme gibi dayanıklılık faktörleri incelenen bir çalışmada betonda % 15 oranında UK kullanımı uygun olacağı belirtilmiştir.

Günümüzde betonun dayanımının yanı sıra dayanıklılığının da önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla daha dayanıklı beton üretmek için betonun rötreten dolayı oluşan mikro çatlaklarının azaltılması, daha az çimento ile yüksek oranda UK kullanarak istenilen dayanımların sağlanması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Beton üretiminde yüksek oranda UK kullanmak betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiği gibi ekonomi sağlar ve çevre kirliliğini azaltır.

Gelişen teknoloji ile beraber enerji kullanımı giderek artmaktadır. Bu nedenle endüstriyel atıklardan olan UK miktarı her geçen gün artmaktadır. Termik santrallerde

büyük miktarlarda toplanan UK çevreye zarar verdiği gibi toplanması halinde depolama ve yok edilmesi ekonomik olmamaktadır (Topçu ve Canbaz 2001).

Uçucu küller içerisinde bulundukları karbon ve sülfürden dolayı çimentoyla reaksiyona girdiklerinde beton içerisinde alkali oranını arttırmakta ve bunun sonucunda ise korozyonu hızlandırmaktadır.

Ayrıca uçucu kül, içerisinde bulunan yanmamış karbonların miktarına göre; betonun elektrik iletkenliğini artırır, harç ve betonla ilişkilendiğinde siyah bir renk alır ve içerisinde bulunan yanmamış karbon oranı arttıkça da su ihtiyacı artar (Ha et al. 2005).

Bir portland çimentosu ve puzolan karışımı reaksiyona girdiği zaman, bu reaksiyon, sönmüş kirecin ve alkalilerin, ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) oksitleri ile asit-baz reaksiyonu biçiminde tepkimeye girmesiyle vuku bulur.

Bu reaksiyonda iki olay gerçekleşir: birincisinde, serbest sönmüş kireç miktarı zamanla azalır, ikincisinde de, portland çimentosunun hidratasyonu esnasında ortaya çıkanlara benzer biçimde, C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) ve kalsiyum-alüminosilikat miktarlarında artış olur. Çimento pastasında gözenek yapısındaki iyileşme (azalma) biçiminde fiziksel olarak kendini gösteren puzolanik reaksiyon, kimyasal dayanıklılık ve mekanik dayanımdaki artışın esas nedeni olabileceği belirtilmektedir.

Portland çimentosu ve puzolan karışımları, ekonomik sebepler, enerji krizini azaltmaya yardım etmek ve bazı önemli teknik yararlar elde etmek amaçlarıyla beton inşaatlarda kullanılmaktadır.

Ekonomik kazanç sağlamak veya erken hidratasyon ısını azaltmak, ileri yaşlardaki dayanımı arttırmak, alkali-agrega reaksiyonu tahribatına veya sülfat tahribatına direnci arttırmak, su sızdırmasını azaltmak ve parçalayıcı sıvı çözeltilerin beton içine sızmasına direnci arttırmak amaçları için portland

çimentosuna veya katkıli portland çimentosuna, uçucu kül, doğal puzolanlar, öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi maddeler belirli oranlarda karıştırılabileceği belirtilmektedir. Betonda doğal puzolan kullanmanın yararları, ileri yaşlarda artmış mukavemet, değişen renk, sülfatlı ortamda iyileşmiş dayanıklılık ve alkali-agrega reaksiyonlarının engellenmesidir.

1997 yılında, ilgili Avrupa normlarına benzer olarak, çeşitli adlarda altı farklı puzolan-katkıli portland çimentosuda; 12139, 12140, 12141, 12142, 12143, 12144 nolu TS'lerde tanımlanmış ve ticari geçerlilik kazanmıştır.

Bu alandaki mevcut bilgiler, katkı malzemelerini ihtiva eden çimentoların zamana karşı dayanım performansının, katkısız çimento ile ileri yaşlarda hemen hemen aynı olduğu hatta bazı tip çimentoların katkısız çimentoları geçtiği yönündedir.

İyi bir beton elde etmek için iyi bir karışım ve yerleştirmenin yanı sıra dayanım kazanma evrelerinde betonun uygun bir ortamda kürü gerekmektedir. Kür, çimentonun hidratasyonu sağlayacak prosedürlerin tümüne verilen addır, sıcaklık ve nemin kontrolünü kapsar. Daha spesifik olarak kürün amacı çimentonun hedeflenen miktarı hidratasyonu sağlayıncaya kadar betonu suya doymuş veya neredeyse suya doymuş ortamda bulundurmaktır (Karaman vd. 2005).

Mishra ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada ise; çimentoyla beraber F ve C sınıfı uçucu kül kullanılmış ve bünyede gerçekleştirdikleri hidratasyon ultra ses hızı ile incenmiş ve çimentoya katılan uçucu külün hidratasyonu geciktirdiği ultrases sonuçlarına göre tespit edilmiştir.

Ayrıca, F sınıfı uçucu kül-çimento kompoziti ile karşılaştırıldığında, C sınıfı uçucu kül-çimento kompozitinin daha düşük elastik modülü değerleri verdiği (Mishra et al. 2003) ve kullanılan F tipi uçucu külle, çimento kompozitinin akışkanlığının, uçucu kül tane dağılımıyla geniş oranda etkili olduğu belirtilmiştir (Lee et al. 2003).

Uçucu külün kullanımıyla uzun dönemde, uçucu kül-çimento kompozitlerinin dayanımını ve durabilitesi artmaktadır. Bu yararının yanı sıra uçucu külün hidratasyonu geç başlatması bir handikap olup bunun önlenmesi amacıyla;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ve organik bir bileşik olan trietanolamin kullanılmıştır (Lee et al. 2003).

Zhang ve arkadaşları, % 40-60'a kadar değişen oranlarda uçucu kül içeren çimentoya, % 3'lük  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  katkısı yaparak hidratasyonu hızlandırdıklarını belirtmişlerdir (Zhang et al. 2000).

Yapılan bir dizi çalışma sonunda da, % 20-30 oranında uçucu kül kullanımının korozyon direnci ve beton dayanımı açısından olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Saraswathy et al. 2003).

Yakın geçmişte yapılan birkaç araştırma sonucunda (Şahmaran vd. 2004); Uçucu küllerin, kendiliğinden yerleşen betonların (KYB) kohezyonunu sağlamak, kullanılan çimento miktarını azaltmak ve dolayısıyla, bir yandan daha ekonomik KYB elde ederken diğer yandan da beton sıcaklığını düşürmek amacıyla kullanılabilen görüşü öne sürülmektedir.

Diğer bir açıdan katkı olarak uçucu kül miktarı ve pişirme sıcaklığı artışıyla kızdırma küçülmesi artmakta, uçucu kül içeren tuğlaların su emmesi tuğla kilinden yapılmış tuğladan daha yüksek çıkmış ve tuğlaların birim hacim ağırlığı katkı olarak uçucu külün miktarının artmasıyla azalmış ve pişirme sıcaklığının artmasıyla arttığı gözlenmiştir (Tütünlü ve Atalay 2001).

Uçucu külün kullanımı, değerli element çıkarımında (tuğla, çimento, agrega) gibi bir çok alanda on yıllardır çalışılmaktadır. Hala kullanım miktarı çok azdır. Yapı tuğlaları genellikle yanma ve kurumadan sonra farklı yollarda şekillendirilip, karıştırılan kum ve kil karışımından yapılır. Tuğla için kil, gelişmiş uygun plastiklik ve aşırı büzülme yapmadan hızlı kuruma yeteneğinde başlamasının

özelliklerini ve dayanımını isteğe göre yapmak zorundadır. Yapı tuğlaları yapımında uçucu külün kullanımı üzerine detaylı birkaç çalışma vardır.

Uçucu külün bünyede bulunmasına rağmen 240 kg/cm<sup>2</sup>'lik kalıp basıncında otoklavlama metodu sayesinde standart kaliteye uygun yapı tuğlası üretilmiştir. Uçucu kül katılan tuğlalardaki bazı problemler; yüksek su emme, alçak aşınma direnci, alçak ateş direnci ve yüksek porozite gibidir (Tütünlü ve Atalay 2001).

Uçucu kül, alçı ve kireç kullanarak oldukça düşük yoğunluğa sahip, yeterli mukavemeti olan izolasyon amaçlı yapı ürünleri üretilmiştir. Farklı kalitede uçucu kül kullanımına bağlı olarak bünyelerde meydana gelen ettringite fazının varlığı incelenerek mukavemet üzerindeki etkileri incelenmiştir. CaO oranı düşük olan uçucu külde ettringit fazının oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Benzer bir çalışma, yüksek oranda P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> içeren alçı (phosphogypsum) ile yapılmıştır. Farklı oranlardaki uçucu kül miktarlarına bağlı olarak optimal uçucu kül miktarını belirlemiştir (Demir 2005).

Yapılan çalışmalar, CaO, MgO ve SO<sub>3</sub> gibi bazı zararlı maddelerin hacim genişlemesini tetikleyen etkenler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu zararlı maddelerin çimentoda belli sınırların altında tutulmaları gerekmektedir. CaO miktarı kütlece % 3, MgO miktarı ise kütlece % 4.5'ten fazla olmamalıdır. İşte bu noktada doğal puzolanlar, inceliklerine bağlı olarak bu zararlı maddelerle tepkimeye girmekte ve bunların çimento içerisindeki oranlarını düşürmektedir.

Doğal puzolanlar ince öğütülme yetenekleri sayesinde çimento hamurundaki mikro boşluklara kolayca girmekte ve çimento hamurunun iskelet yapısını değiştirerek dayanıklılığını artırmaktadırlar. Buna ilaveten doğal puzolanlar, ince taneli olmaları sayesinde çimento harcı ve beton üzerinde kayganlaştırıcı bir etki de ortaya koymaktadırlar. Bu etki taze betonun kıvamını ve dolayısıyla

işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ancak doğal puzolanlar, çimentonun toplam özgül yüzeyini artırdıkları için su ihtiyacını da artırabilmektedirler.

Kaynaklar ayrıca, portland çimentosunun ve doğal puzolanın bir karışım halinde uygulandığı harçlarda ve betonlarda katılma sürelerinin, puzolanın katılım oranına, inceliğine ve reaktivitesine bağlı olarak gelişme gösterdiğini ifade etmektedirler.

Puzolanlar, betonda klinkerin hidratasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimeye girer ve bu nedenle betona su karıştırıldıktan sonra, bir süre ortamda  $\text{Ca(OH)}_2$ 'in toplanma süresince portland çimentosuna seyreltici bir etki yapar. Ancak zamanla ortamda  $\text{Ca(OH)}_2$  birikmesi, puzolanların da sistemin dayanımını artıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlar. Bu nedenle, puzolan kullanımıyla betonun erken dayanımında bir düşüş olması beklenir. Sonuç olarak portland çimentosu ile puzolan karışımı içeren çimentolar, dolayısıyla betonlar özdeş incelikte portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süre suya (kür) ihtiyaç duyarlar. Buradan da anlaşılacağı üzere traşlı çimentolarla üretilen betonların, ancak geç dayanımlarının eşdeğer karşılaştırma örneklerinin sonuçlarına ulaşması hatta bunları geçmesi beklenir.

Yapılan çalışmalar, gereğinden fazla ince öğütülmüş puzolan malzeme içeren çimentoların, portland çimentosu taneciklerinin hidratasyon neticesinde birbirinden fazlaca uzaklaşmaları sonucu, basınç dayanımlarında düşüğe sebep olabileceğini de bildirmektedir. Ancak yeterli (daha uzun) süre sonunda, puzolan taneciklerinin de tepkimeye girmesi sonucu bu dayanım farkının azalmış olduğu görülecektir. Bu bağlamda bir diğer dayanım etkeni de ince öğütülme yeteneğine sahip trasın mikro boşlukları iyi bir biçimde doldurabilmesi olarak ortaya çıkmaktadır (Yetgin ve Çavdar 2005).

İnsanların su içinde de priz yapabilen, su etkisiyle erimeyen bağlayıcı üretme çabaları çok eski çağlara kadar uzanır. Sorunun kesin çözümü çimentonun icadı ile mümkün olabildiği. Pişmiş ve öğütülmüş kil yapay bir tras, doğal volkanik



camlar ise doğal bir tras türü olarak bilinir. Puzolanlar kimyasal olarak  $\text{SiO}_2$  ve az miktarda  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan maddelerdir. Suyla karıştırıldıklarında çamur haline gelir, kuruduktan sonra tekrar eski hallerine dönerler. Ancak bunlar kireçle karışırlarsa bağlayıcılık kazanır ve suda erimeyen bir kalsiyum silikat tuzuna dönüşürler. Eğer bir malzeme kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebiliyorsa, o malzeme için puzolanik aktiviteye sahiptir denilir ve puzolan diye adlandırılır.

Puzolanik reaksiyon;  $\text{CH} + \text{S} + \text{H} \rightarrow \text{C} - \text{S} - \text{H}$  şeklindedir.

Çoğu betonlar ve harçlar asıl bileşen olarak normal portland çimentosu ihtiva ederler. Sağlam bir mikro yapı oluşumu, su/çimento oranına, karışım oranına ve kür şartlarına v.b. bağlıdır.

Ancak, normal portland çimentolu karışımlar:

- a) Su ve kimyasal hücumunun hızlı geçişine müsaade eden çimento hamuru ve ara yüzey geçiş bölgesi boşluğu,
- b) Hidratasyon esnasında yüksek seviyede kalsiyum hidroksit üretimi gibi olumsuzluklara hassas olabilirler.

Kalsiyum hidroksit az çözülebilen ve reaktif bir malzemedir. Günümüzde, birkaç modern beton karışımları puzolanik reaksiyon vasıtasıyla kalsiyum hidroksitin tüketilmesi sonucu kalsiyum hidroksit konsantrasyonu azaltılarak ve mikro yapıyı sağlamlaştıran katkıları kullanılarak iyileştirilmektedir. Çimento bileşiminin mikro yapısında yapılan bu değişim, dayanıklılık ve hizmet ömrü özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir (Dursun vd. 2005).

Uçucu kül alkali zeminlerde ve asit ortamını düzenlemek için zemin dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, kül özellikleri ve zemine bağlı olarak değişim derecesini ve zeminin kimyasal ve fiziksel karakteristiğini değiştirmektedir. Uçucu kül, zemin dayanımının artışı ve organik karbon

içeriğinin artmasını, düşük hidrolik iletkenliğini, yüksek su tutma kapasitesini ve zeminin daha az bulk yoğunluk değeri elde etmesini sağlamaktadır.

Zeminin kimyasal özellikleri üzerine uçucu külün etkisi başta pH olmak üzere külün karakteristiğinden dolayı oldukça büyüktür. Alkali uçucu külün zeminde uygulanması her zaman zemindeki pH oranının azalmasıyla yakından ilişkilidir. Zeminde uçucu külün uygulanmasıyla 5,4'den 9,9'a kadar kalkerli olan zeminin pH derecesini ortalama % 8 gibi bir oranda arttırmaktadır (Karla et al. 2000).

Uçucu kül termik santrallerde yakılan kömürden elde edilen en büyük atıklardan biridir. Dünya üzerinde yıllık 3000 milyon ton kömürden 300-350 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir. Uçucu külün potansiyel tehlikeleri;

1. Yer altı suyuna ve zeminin içine, uçucu külden olası zehirli maddelerin sızması,
2. Bitkilerde esas elementleri değiştirir.
3. Besin zinciri boyunca bu zehirli elementlerin geri dönüşümünü artırır.
4. İnsanlarda solunum problemleri başlar (Mendki et al. 2001).

### 3. UÇUCU KÜL

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık ürünüdür. Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kaplamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olurlar (Türker vd. 2003).

Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı çok ince olan, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip kül tanecikleri ortaya çıkmaktadır. Çok ince tanelere sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber “uçarak” bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Nispeten ağır olan iri kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşmektedirler. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75 - % 80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere “uçucu kül” denilmektedir (Erdoğan 2003).

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği gösterirler (Türker vd. 2003).

Uçucu külün kimyasal bileşimi portland çimentosu ile çok büyük benzerlikler göstermektedir. Portland çimentosu ve uçucu külde aynı bileşikler mevcuttur. Hızlı soğumadan dolayı bu uçucu küller amorf fazda, çimentolar ise yavaş soğumadan dolayı kristal fazda bulunmaktadır. Uçucu kül ile çimento arasındaki temel farklılık ise farklı bileşiklerin her birinin miktarlarındaki ilişkidir. Portland

çimentosu kireç (CaO) bakımından zenginken uçucu külde kireç miktarı azdır. Uçucu kül yüksek miktarda reaktif silikatlara sahipken portland çimentosu daha az miktarda reaktif silikatlara sahiptir.

Normal şartlarda portland çimentosu hidratasyon süresince CaO üretmektedir. 100 pound (~ 45,36 kg) çimentonun hidratasyon süresince serbest bıraktığı kireç miktarı ise 20 pounddur (~ 9,07 kg). Sıradan portland çimentosunun hidratasyon düzeninden farklı olmayan sağlam ve dayanıklı bir yapı oluşturması için serbest kalan kirecin uçucu kül silikatlarıyla reaksiyona girmesi gerekmektedir.

Uçucu kül ve portland çimentosunun kimyası gözden geçirildiğinde her iki malzemenin özellikleriyle, etkili kullanımın ve beton üretiminin artacağı görülebilir. Puzolanik aktivite boyunca uçucu kül, portland çimentosunun hidratasyonu ile birleşmiş aynı çimento bileşiklerini oluşturmak için serbest kireçle birleşir (Technical Bulletin-2, A.B.D.).

Türk Standartları Enstitüsü, UK ile ilgili olarak beş tane standart yayınlamıştır. Bunlar sırasıyla, TS 639 (TS, 1975), TS 640 (TS, 1992), TS EN 450 (TS, 1998), TS EN 451-1 (TS, 2000) ve TS EN 451-2 (TS, 2000) standartlarıdır. Bu standartlara ait bilgiler, Çizelge 3.1’de sunulmuştur. TS 640, AB’ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197-1 (TS, 2002) “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar” standardı uygulamaya konulmuştur.

Çizelge 3.1 UK ile ilgili Türk Standartları (Aruntaş 2006).

Standart no	Standartın adı	Açıklama
TS 639	Uçucu küller-çimentoda kullanılan	Tarifi, sınıflandırılması, özellikleri, deney metotları ve kalite kontrolü
TS 640	Uçucu küllü çimento	Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney metotları
TS EN 450	Uçucu kül-betonda kullanılan	Özellik ve kalite kontrolü
TS EN 451-1	Uçucu kül- Deney metodu-Bölüm 1	Serbest kalsiyum oksit tayini
TS EN 451-2	Uçucu kül-Deney metodu-Bölüm 2	Islak eleme ile incelik tayini

Türkiye’de UK kullanımına ait detaylı veriler bulunmamakla birlikte genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığı görülmektedir (Aruntaş 2006).

### 3.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu külden bulunan başlıca bileşenler;  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca;  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$  alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Bunların yanı sıra birde C ( çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) bulunmaktadır (Türker vd 2003, Erdoğan 2003).

Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 nolu standard, uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir (ASTM C 618, 1998). Bu sınıflandırma, Çizelge 3.2’de tanımlanmaktadır.

Ayrıca, %10’den daha az  $\text{CaO}$  içeren uçucu küller, ‘düşük kireçli uçucu küller’, %10’den daha çok  $\text{CaO}$  içerenler ise, ‘yüksek kireçli uçucu küller’ olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır.

Çizelge 3.2 ASTM’ye göre uçucu kül sınıfları (Erdoğan 2003).

Sınıf	Tanım
F	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 70$ ; antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğe sahip.
C	$\% 70 > \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq \% 50$ ; linyit veya düşük bitümlü kömürlerden elde edilmekte; puzolanik özeliğin yanı sıra kendiliğinden de bir miktar bağlayıcı özeliğe sahip.

ASTM C 618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.

b) 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. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde CaO > %10 olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanısıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Türker vd 2003, Erdoğan 2003).

Siliko alüminalı UK, F sınıfındadır. Siliko kalsik UK'lerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfü kalsik UK'lerin çoğu, C sınıfı UK olarak isimlendirilmektedir.

Diğer bir sınıflandırma, TS EN 197-1'e göre yapılmakta ve UK, iki kategoriye ayrılmaktadır. Buna göre UK'lü çimentolarda kullanılacak olan UK'ler, silisli ve kalkerli UK'ler olarak sınıflandırılmıştır (Aruntaş 2006).

TS EN 197-1'e göre sınıflandırmada uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:

a) V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir.

b) W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan; geri kalanı

demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğ er bileş enleri iç eren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç ( $\text{CaO}$ ) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir (Türker vd 2003, Erdoğan 2003).

UK, yapısındaki kireç ve  $\text{SO}_3$  miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

a) Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen,  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$  (S+A+F) toplamı % 70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı UK,

b) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik UK,

c) Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğ erlerine göre daha fazla  $\text{SO}_3$  ve  $\text{CaO}$  ihtiva eden sülf o kalsik UK'lerdir (Aruntaş 2006).

### **3.2 Uçucu Küllerin Özellikleri**

#### **3.2.1 Kimyasal Özellikler**

Uçucu külün kimyasal yapısı kömürün farklı yerlerden elde edilmesinden dolayı farklılıklar göstermektedir. Buna rağmen uçucu külün temel bileşikleri silis ve alüminadır (Satapathy 2000).

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileş enler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, diğ erleri  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$  ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon, ve bunun yanı sıra

titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir.

Temel oksitler olan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  in miktarları, uçucu külün silisi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde  $\text{SiO}_2$  % 25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  % 10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  % 1-15 olarak ve  $\text{CaO}$ , % 1-40 değerleri arasında bulunmaktadır.

Diğer oksitlerden  $\text{MgO}$  en fazla % 5.0, alkali oksitler ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) % 5.0'in altında bulunmaktadır.  $\text{SO}_3$ , genellikle % 0.2-2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre, % 10 'a kadar yükselmektedir. Ancak standartlardan özellikle TS EN 450 standardı,  $\text{SO}_3$  değerini en fazla % 3 olarak dar bir aralık ile sınırlamaktadır.

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.

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi diğer silisli bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az % 25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise, düşük kireçli küllerde % 10 'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir (Erdoğan 2003).

Matsunaga (2002), tarafından yapılan çalışmada; uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. EDX ve X-Ray difraksiyon analiz sonuçları, uçucu külün az miktarda kalsiyum içerdiğini, esasen bir karışımda;



$\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içerdiğini göstermiştir. Ek olarak az miktarda alkali oksitler ve birkaç metalik konsantrasyon elde edilmiştir. Uçucu külün morfolojisi ve yapısının değişken ve kompleks olduğu tespit edilmiştir. Uçucu kül tanelerinin şekli, yüzey geriliminden dolayı küresel ve yapısı soğutma hızı tarafından etkilenmiş olan tane boyutuna bağlıdır.

Uçucu kül tanelerinin yapısı ve kimyasal bileşimi, kompozitlerinde olduğu gibi münferit uçucu kül parçalarının mekanik özelliklerini etkileyebilir. Uçucu küllerin; kristallik değişimi, mikro kimyası, yoğunluğu ve mikro sertliği kompozitlerin dizaynında ve kompozit özelliklerine etkisini anlamada gerekmektedir (Matsunaga et al. 2002).

Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir (Tanosaki 1998).

### **3.2.2 Mineralojik Bileşim**

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar (Ca, Mg, Fe)) ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı (kristalsiz) ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır.

Genellikle düşük CaO içeren küller başta camsı faz ve minör olarak da kuvars ( $\text{SiO}_2$ ), mullit ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), manyetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) içermekte; yüksek CaO' li uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ), serbest kireç,  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), CS ( $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ),  $\text{C}_2\text{S}$  ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ), mellilit ( $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$ ), merwinit ( $\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$ ), gibi mineraller ve camsı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanı sıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit

(Ca(OH)<sub>2</sub>), trisülfoalüminat (4CaO.3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O) ve mullit' de bulunabilmektedir. Her iki külde de alkali feldispatlara rastlanmaktadır.

Düşük ve yüksek kireçli uçucu küllerin camsı fazı karakterize eden X-ışınları difraksiyon piklerinin maksimum durumları da birbirinden farklıdır. Camsı fazın difraksiyon pikinin maksimum olduğu bölge düşük kireçli uçucu külde 22-27° 2θ (CuKα) bölgesinde iken, yüksek kireçlide bu bölge 30-34° 2θ (CuKα) bölgesinde yer almaktadır. Silissi camsı fazın 22-34° 2θ arasında değişmesi, silisyum dioksit kristal örgü ağının (siliko tetrahedral), Al, Ca, Na gibi çeşitli katyonlar ile modifiye edilmesinden kaynaklanır.

Uçucu külün mineralojik bileşimi (camsı fazın durumu, kristal yapıları), külün puzolanik özelliklerini etkilemektedir. Özellikle camsı fazın durumu uçucu külün reaktivitesinde etkin olmaktadır. Düşük kireçli uçucu küldeki camsı fazın yapısı, SiO<sub>2</sub> açısından zengin, oldukça polimerize silissi veya alüminyum da içeren alümino silikat bileşimindedir. Silissi veya alümino silikat camsı fazı, düşük kireçli külün reaktif bileşeni olup, su ve kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek, küle puzolanik özellik kazandırmaktadır.

Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize fazlardır (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi). Burada, saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruftaki yapıya da benzemektedir. % 20'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı 12CaO.7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğın yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır.

Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde, yavaş olarak reaksiyona girerken; yüksek kireçli küldeki kalsiyum alüminosilikat camsı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı fazları oluşturur. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu külün camsı fazının düşük kireçliden daha az, ancak daha reaktif olduğu bilinmektedir.

Yüksek kireçli küllerdeki kristalize fazlar (anhidrit, serbest kireç gibi), külün kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, standarttaki sınırlar ( $\text{SO}_3$  en fazla %3 ve %5, sırasıyla ASTM C 618, TS 639, ve TS EN 450), (serbest kireç TS EN 450'de %1) aşıldığı takdirde  $\text{SO}_3$  fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişmesi (aktif alümina ve  $\text{SO}_3$ 'den ettringit oluşumu), serbest kireç ise hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genişme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Yine yüksek kireçli uçucu külde bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de, külde yüksek  $\text{SO}_3$  olduğunda reaksiyona girmekte, buna karşılık düşük kireçli küldeki kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu halde inert bileşen olarak kalmakta; dolayısıyla sülfat genişmesine yol açmamaktadır (Türker vd. 2003).

### 3.2.3 Morfolojik Özellikler

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (% 60-% 90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde; mullit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir.

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık % 5'i (hacminin % 20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır.

Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150  $\mu\text{m}$  arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak 2,1-2,7 (ortalama 2,4)  $\text{g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir (Erdoğan 2003).

Tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında; kömürün orijini ve uniform olması, kömürün pulverizasyon durumu, yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır.

Uçucu külde, büyüklükleri 0.5 µm -150 µm arasında değişen camsı küresel ve şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır.

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldispatlar gibi); düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır.

Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz küresel tanecikler ve bunun yanı sıra, senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen bir mikro yapıya sahiptirler.

Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içinde, küresel ve köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir.

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 µm'nin altında olması (10-20 µm) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler.

Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az oranda camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçlide ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır (Türker vd. 2003).

Camsı küresel şekilli tanecikler; içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere); boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres); büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere); yüzeyi düzensiz dağılmış

şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar; yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar (dermasphere) deforme yapılar; yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir (Bosbach ve Enders 1998).

Uçucu kül taneleri; “Katı” ve “Boşluklu” olarak iki tipte sınıflandırılmıştır. Genellikle, uçucu külün katı küresel taneleri “Katı Uçucu Kül” olarak adlandırılır ve yoğunluğu  $1,0 \text{ gr/cm}^3$ 'den daha az olan, uçucu külün boşluklu tanelerine ise “Boşluklu Uçucu Kül” tanımlaması yapılmıştır. Uçucu küllerin ortak yanı genellikle; kuvars, mullit ve hematit gibi kristal bileşiklerden; silika camı gibi camsı bileşiklerden ve diğer oksitlerden meydana gelmesidir.

$2,0-2,5 \text{ gr/cm}^3$  arasında bir yoğunluğa sahip olan “Katı Uçucu Kül”, yoğunluğu azaltır, direnç kazandırır, dayanım, sertlik içerir ve seçilmiş matris materyallerinin çeşitli özelliklerini geliştirebilir.

“Boşluklu Uçucu Kül”, boşluklu uçucu kül tanelerinden oluşur ve  $1,6-11,0 \text{ gr/cm}^3$  arasında olan metal matrislerin yoğunluğuyla karşılaştırıldığında,  $0,4-0,7 \text{ gr/cm}^3$  arasında olan önemli düşük yoğunluğundan dolayı çok hafif kompozit materyallerin sentezleri için kullanılabilir.

Katı uçucu külün morfolojisi tanelerin boyutuna bağlıdır. Küçük olan katı taneler, büyük olan katı uçucu kül tanelerinden daha küresel bir yapıya sahiptir. Fakat; boşluklu uçucu kül, katı uçucu külden daha küreseldir ve şekli boyuta bağlı değildir.

Mullit ve kuvars camsı fazlardır. Uçucu kül ebatları arttıkça, katı uçucu kül'de toplam kristal fazların hacim kesri de artar.

Boşluklu uçucu külden ise; tanelerin boyutu arttıkça mullit yoğunluğu azalmakta, kuartz ise tane boyutuna göre değişim göstermektedir.

Katı uçucu kül tanelerinin boyutlarında azalma olduğunda kimyasal elementlerin oranında artış gözlemlenmiştir.

Katı uçucu külün aksine, boşluklu uçucu külden kristal fazın toplam hacim yüzdesi, tane boyutları artarken düşmektedir.

Katı uçucu kül tanelerde ise kuvars sabit bir şekilde tane boyutu arttıkça artmakta; mullit ve toplam kristallik ise özellikle 100 µm'dan sonra hızlı bir biçimde artmaktadır (Matsunaga vd. 2002).

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldispatlar gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan (kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır.

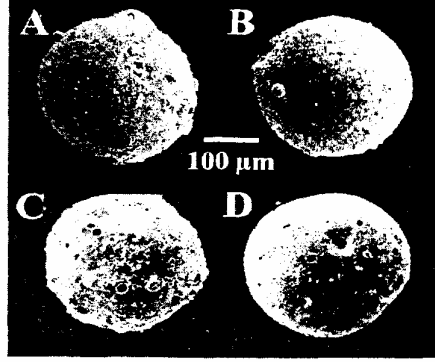
Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptirler.

Yüksek kireçli küllerde, mikro yapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir.

Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı (lubricant) nitelik taşıması ve dolgu maddesi (microfiller) özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını artırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır.

Şekil 3.1'de gösterilen, Camsı küresel şekilli tanecikler; içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere); boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres);

büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere); yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar; yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar (dermasphere) deforme yapılar; yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir.



Şekil 3.1 Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı (Türker vd. 2003).

- (a) Yüzeyinde birikimler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik
- (b) Camsı küresel tanecik
- (c) Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik
- (d) Boşluklu küresel tanecik

#### 4. ÇİMENTO

Çimento, belli oranlarda karıştırılan kil ( $mSiO_2.nAl_2O_3.pH_2O$ ),  $Fe_2O_3$  ve kalker ( $CaCO_3$ ) karışımının çeşitli sıcaklık derecelerinde (1200-1450 C°) pişirilmesi sonucu elde edilen, havada ve suda katılaşma özelliği gösteren, gri veya beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür (Eriç 1994).

Çimento, su ile karıştırıldığında hidrasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur (pasta) oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımını ve kararlılığını koruyan, inorganik ve ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır.

TS EN 197-1 (TS, 2002), standardına uygun çimento, CEM çimentosu diye adlandırılır. Agregası ve su ile uygun şekilde harmanlanıp karıştırıldığında, yeterli süre işlenebilirliğini muhafaza eden ve belirlenmiş periyotlarda belirli dayanım seviyelerini kazanan ve uzun süre hacim sabitliği gösteren, beton veya harç üretilen çimentodur.

CEM çimentosunun hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidrasyonu nedeniyle olur. Diğer kimyasal bileşenler, mesela alüminatlarda, sertleşme işlemine iştirak edebilirler (TS EN 197-1, 2002).

CEM çimentosunda oranlar TS EN 196-2'ye göre tayin edildiğinde, reaktif kalsiyum oksit ( $CaO$ ) ve reaktif silisyum dioksit'in ( $SiO_2$ ), oranlarının toplamı kütlece en az % 50 olmalıdır (TS EN 196-2, 2002).

Çimentolar ana maddeleri ve bileşenlerinin oranlarına göre sınıflandırılır. Farklı çimento tipleri üretmekteki amaç, uygulamanın gerektirdiği çeşitli özelliklere sahip bağlayıcı malzeme elde etmektir.

Bugünkü anlamda ilk çimento üretimini gerçekleştiren, 1824 yılında Joseph Aspdin adında bir duvarcı ustası olmuş ve senelerce bu keşfini saklayarak ailesine



sır olarak intikal ettirmiştir. Çimento üretimi ancak, sırasıyla Fransa'da 1848, Almanya'da 1852, Belçika'da 1855, ABD'de 1871 yıllarında başlamıştır.

Günümüzde kullanımı ve üretimi bakımından en yaygın tipi oluşturan portland çimentosu diğer özel çimentoların kökenini oluşturmaktadır. Kil ve kalkerin pişirilmesi sırasında meydana gelen kimyasal değişimler aşağıda gösterilmiştir:

100-200 C°	: Nem kaybolur.
200-500 C°	: Kilin kristal suyu bünyeden ayrılır. SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> açığa çıkar.
700-800 C°	: Kalker ısı ile ayrışır, CaO açığa çıkar.
900 C°	: SiO <sub>2</sub> .CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .CaO ve Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .CaO meydana gelir.
1200 C°	: 2CaO.SiO <sub>2</sub> oluşur ve ilk erime başlar.
1250 C°	: 2CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> bileşikleri meydana gelir. Kristal sistem oluşur.
1300 C°	: 3CaO.SiO <sub>2</sub> meydana gelir.
1450 C°	: Soğuma sonucu klinker oluşur.

Klinkerin yavaş soğuması trikalsiyum silikatı (3CaO.SiO<sub>2</sub>) dikalsiyum silikat (2CaO.SiO<sub>2</sub>) haline dönüştürebilir.

Bu yavaş soğuma sonucu çimentoluk özelliği kaybolma tehlikesine uğrayabilir. Yavaş soğutulmuş çimento bileşiminde tri kalsiyum alüminat (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) az, hızlı soğutulmuş çimentoda fazla miktarda bulunur. Üretim sonucunda klinker bünyesindeki CaO ve SiO<sub>2</sub> oranlarının araştırılması ve standartta belirtilen değerlerle karşılaştırılması mukavemet açısından yararlıdır.

CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 2.80'e yakın olması çimento mukavemetini artırır. Ancak CaO miktarının gereğinden fazla olması hidratasyon sonucu serbest kireç (CaOH<sub>2</sub>) açığa çıkaracağından, çimentonun suda erime tehlikesi söz konusudur. Ayrıca Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0.64 olması halinde, priz ısı azalmakta, katılma hızlanmaktadır.

Kil ve kalkerin çeşitli sıcaklıklarda pişirilmesi sonucunda meydana gelen bileşenlerden, portland çimentosunun bünyesinde: % 50  $C_3S$ , % 30  $C_2S$ , %10  $C_3A$ , % 10  $C_4AF$ , Alüminli çimentoda:  $C_3S$ ,  $CA$ ,  $C_3A_3$ , Traslı çimentoda:  $CS$ ,  $CS_2$ ,  $CAS_2$ ,  $C_2AS$  yer alır (Eriç 1994).

Portland çimentosu klinkerinde dört ana faz mevcuttur ve klinkerleşme sıcaklığı yaklaşık 1400-1450 °C'dir. Temel faz Alit'in ( $C_3S$ ) yanı sıra, Belit ( $\beta$ - $C_2S$ ), Celit ( $C_3A$ ) ve Brownmillerit ( $C_4AF$ ) minerallerinden oluşur.

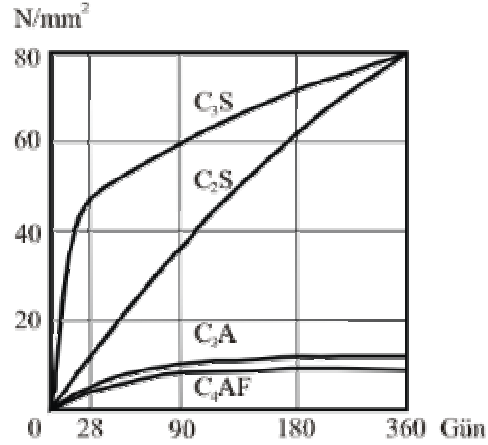
Klinker fazları silikat ve katı eriyik fazları olarak iki gruba ayrılabilir. Silikat fazlarını oluşturan alit ve belit kristalleri incelenmiş ve faz yapıları ile ilgili şu bilgiler edinilmiştir:

Alit (trikalsiyum silikat,  $C_3S$ ) klinker kütlelerinin % 40-70'i arasında olabilir ve 28 güne kadar basınç dayanımı gelişimini sağlayan en önemli bileşendir. Kristal boyutu 150  $\mu m$ 'ye kadar çıkabilir. Su ile hızlı reaksiyona girer ve çimento dayanımı ile hidratasyon ısını kontrol eden fazdır. 1250 °C'nin altında soğutma hızı çok yavaş değilse, normal sıcaklıklara kadar stabilitesini korur. Çok yavaş soğutma hızlarında ise alitin bir kısmı çözülür ve belit oluşur.

Belit (dikalsiyum silikat,  $C_2S$ ) klinker kütlelerinin % 15-45'i arasında olabilir ve 28 güne kadar basınç dayanımı gelişimine katkısı azdır ve ileri yaşlarda dayanıma olan katkısı daha önemli düzeydedir. Dairesel kesitli kristal yapısına sahiptir. Kristal boyutu 5-40  $\mu m$  arasındadır. Belit alite kıyasla daha az reaktif olup ileriki yaşlarda dayanıma katkı yapar.

Tri kalsiyum alüminat ( $C_3A$ ) ve ferrit ( $C_4AF$ - tetrakalsiyum alüminoferrit) ara faz veya matris fazı olarak adlandırılır. Silikat fazlarının etrafını sarar ve bu fazları bağlarlar.  $C_3A$ , klinker kütlelerinin %1-15'i arasında olabilir. Kristal boyutu 1-60  $\mu m$  arasında değişir. Su ile reaksiyonu çok hızlıdır ve amorf yapılıdır.  $C_4AF$ , klinker kütlelerinin %0-18'i arasında olabilir (Felekoğlu vd. 2005, Gürbüz 2005).

ABD'de ana bileşen oranları farklı ve değişik özellikler gösteren; normal, özel, süper, az ısı veren ve sülfatlara dayanıklı olmak üzere beş tip çimento üretilmektedir. Fabrikalarda bu husus göz önüne alınarak ihtiyaca göre özel tipte çimento üretmek mümkündür.



Şekil 4.1. Çimento bileşenlerine göre dayanım mukavemeti (Eriç 1994).

Çimentonun ana bileşenlerinin özellikleri Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çimento ana bileşenlerinin özellikleri (Eriç 1994).

Bileşen	Bağlayıcılık Değeri	Reaksiyona Girme Hızı	Hidratasyon Isısı
C <sub>3</sub> S	Kuvvetli	Orta (İlk hafta)	Orta
C <sub>2</sub> S	Kuvvetli	Yavaş (İlk yıl)	Az
C <sub>3</sub> A	Zayıf	Ani (İlk dakika)	Çok
C <sub>4</sub> AF	Zayıf	Ani (İlk dakika)	Çok

Çimentonun özelliklerini, çimentonun hidratasyonu ve katılaşması (priz), büzülme (rötre) ve şişmesi, hacim sabitliği, inceliği, norm mukavemeti, zararlı kimyasal etkenler olmak üzere ayrı ayrı incelemek gerekir.

Çimentonun hidratasyonunu ve katılaşma özelliklerini ilk inceleyen H. Le Chatalier (1882), çimento bileşenlerinin su molekülleri ile kristalleşmesi sonucu hidratasyonun meydana geldiğini; "Kristal Teorisi" olarak ortaya koymuş, ancak W. Michaelis (1893) katılaşma olayının koloidal bir kütle şeklinde (pelte)

zamanla büzülüp sertleşme sonucu meydana geldiğini “Jel Teorisi” ile karşıt fikir olarak ileriye sürmüştür.

Günümüzde X ışınlarıyla yapılan son araştırmalar, uzun seneler süren bu teori tartışmalarından her ikisinin de kısmen doğru olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Çimentonun hidratasyonunda jel, stabil jel haline gelirken bir taraftan kristal cisimler oluşmakta, katılaşma (priz) tamamlandığı an çimento tamamen kristal bir hale dönüşmektedir. Ancak kristal cisimler o kadar küçüktür ki, bu tabakanın bir jel özelliğine sahip olduğunu söylemek mümkündür. Böylece stabil bir hal alan jel, birbirine geçerek kenetlenmiş olan kristalleri âdeta tutkallayarak bir bütün haline getirir. Fakat yine de jel özelliği taşınması nedeniyle, kurudukça sertleşmekte ve büzülmekte (rötre), ıslandıkça şişmektedir.

Bu şekilde çimento hamurunda meydana gelen deformasyonlar katı jel ile absorbe jel suyu arasındaki çekim kuvvetleri dengesini bozarak suyun buharlaşmasına ve kristallerin birbirine yaklaşarak çimento hamurunun zamanla mukavemet kazanmasına neden olmaktadır.

Çimento bileşenlerinin tamamen hidrate olabilmeleri için, susuz elemanın ağırlıkça yüzdesi olarak:

Portland çimentosunda	-	$C_3S$ : % 23.7
		$C_2S$ : % 20.9
Alüminli çimentoda	-	$A_3C_3$ : % 43.0
		CA: % 45.6 oranında suya ihtiyaç vardır.

Hidratasyon olayı çimentonun suyla birleşerek bağlayıcılık kazanmasını sağlayan bir kimyasal olaydır. Bu reaksiyon için portland çimentosunun ağırlıkça % 20, alüminli çimentonun % 40 suya ihtiyacı vardır.

Priz, çimentonun katılaşması ve plastik deformasyon kabiliyetini kaybetmesi demektir. Bu olayın başlangıç ve sonunun pratik açıdan belli limitler arasında sınırlandırılması priz süresi olarak tanımlanır.

Çimentonun jel dokusu bulunduğu ortama göre hacim küçülmesine ve genişlemesine uğrar. Kuru ortamda jel suyunun ağırlıkça eksilmesi sonucu meydana gelen büzülmenin (rötre) değeri, her zaman için jel suyunun ağırlıkça artması sonucu meydana gelen şişmenin değerinden daha yüksektir. Bu nedenle çimento hamurunu nemli ortamda muhafaza etmek gerekir. 28 günde meydana gelen rötre miktarı: Çimento hamurunda; % 0.2-0.3, çimento harcında ise % 0.08-0.012 değerindedir.

Şişmenin miktarı ise büzülmeden 1/3-1/10 oranında daha azdır. Rötre nedeniyle meydana gelen çatlaklar malzemede mukavemet düşmesine ve geçirimsizliğe neden olmaktadır. Rötre tehlikesini önlemek için çimentonun su içindeki şişme özelliğinden yararlanılması yanında, genişlemeyi sağlayan sülföalümin ve yüksek fırın cürufu gibi katkı maddeleri ilavesiyle hazırlanmış özel çimentolar kullanılabilir. Bununla ilgili deneyler yapılarak rötre sonucu meydana gelen hacimce küçülmeyi ve çatlakları saptamak mümkündür.

Çimentonun bünyesinde serbest şekilde CaO, MgO bulunması ve hidratasyon olayı sonucunda reaksiyona girerek Ca(OH)<sub>2</sub> ve Mg(OH)<sub>2</sub> oluşturması çimentonun hacimce artmasına yol açmaktadır.

Çimentonun inceliği hidratasyon olayını hızlandırıcı ve bağlayıcılık değerini artırıcı bir faktördür. Suyla temas eden çimento toplam yüzeyinin artması, hidratasyonu hızlandırdığı gibi mukavemeti de yükseltmektedir. Ayrıca 10 mikrondan küçük olan tanelerin varlığı çimento hamurunun plastik ve geçirimsiz olmasını da sağlar. Çimento tanecikleri 6.5-90 mikron arasındadır.

Çimentonun mukavemeti sonsuza dek zamana bağlı olarak parabolik bir artış göstermektedir.

Çimentonun erimesine yol açan, hidrometri derecesi  $ph < 7$  olan saf sular, bünyesinde asit etkisi meydana getiren  $CO_2$  ve  $SO_3$  gazı bulunan sular, fluorhidrit, nitrik, sülfürik ve klorhidrik asitler, bünyesinde genişleme yaparak dağılmasına sebep olan (% 227 oranında hacim artışı Candlot tuzu - çimento basili) amonyum, potasyum ve kalsiyum sülfat (alçı) gibi maddeler kimyasal reaksiyon sonucu çimentoya zarar verirler. Ayrıca deniz suyundaki  $MgCl_2$ 'ün de çimentoya zararlı etkileri vardır.

Günümüzde çimento XX. yüzyıl başlarından itibaren sıva, harç, beton ve özel beton üretimi ile geniş kullanım alanı bulmuştur. Yapıda çimentonun kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken hususların başında, kullanılma yerine ve ortam şartlarına göre çimento tipini seçmek gelir.

Yapıdaki normal uygulamalarda genellikle portland çimentosunun ülkemizde üretilen PÇ 32.5, PÇ 42.5 ve PÇ 52.5 tipleri, kimyasal etkilere maruz (deniz suyu, sülfatlı sular) yerlerde cürufu, traşlı ve henüz ülkemizde üretilmeyen alüminli çimentolar, ateşe dayanıklılık arzu edilen yerlerde cüruf çimentoları, ilk mukavemetin yüksek olması arzu edilen yerlerde PÇ 52.5 ve alüminli çimentolar, geçirimsizlik aranan yerlerde PÇ 52.5, traşlı ve su geçirimsiz katkı maddeleri ihtiva eden özel çimentolar, soğuk bölgelerde yapılacak üretimlerde PÇ 52.5, alüminli çimento ve hava sürükleyici katkı maddeli özel portland çimentoları kullanılmaktadır.

Ekonomik faktörlerin önem kazandığı yerlerde ise traşlı, uçucu küllü çimento ve cüruf çimentoları, dekoratif amaçlarla üretilen renkli ve beyaz yüzeyler için beyaz portland çimentosu tercih edilmelidir.

Kalsiyum esaslı olmakla beraber çimento adı altında bilinen Mg ve Zn oksiklorür çimentosu ( $Sorel\ Çimentosu-3MgO.MgCl_2.11H_2O$ ,  $ZnO.ZnCl_2.11H_2O$ ), ahşap ve camla birleşme özelliği gösteren, ancak demiri korozyona uğratan asitlerden etkilenen ve genellikle renkli özel beton ve ahşap talaş levha üretiminde kullanılan diğer bir organik esaslı bağlayıcı türüdür (Eriç 1994).

#### 4.1 Çimentolarda Bulunan Diğer Maddeler

Çimentolarda az miktarda MgO (magnezi) ile K<sub>2</sub>O ve NaO<sub>2</sub> gibi alkali oksitler bulunabilir. Bu maddeler çok az bir miktarda bulunmasına rağmen bazı hallerde çimentonun kullanılmasını imkansız hale getirebilirler. Çimentoda ayrıca öğütülmeden önce katılmış olan jipsten dolayı az miktarda SO<sub>3</sub> (sülfür anhidrit) mevcuttur. Çimento üretiminde kullanılan kömürden dolayı bir miktar SO<sub>3</sub> çimentoya karışabilir. Aynı zamanda kil ve kalker karışımında da az miktarda SO<sub>3</sub> bulunabilir. Çimentodaki SO<sub>3</sub> miktarı küçük bir değer de olmakla beraber bunun varlığı bazı hallerde çimentonun kullanılmasında önemli zararlar meydana getirebilir.

#### 4.2 Çimentonun Karmaşık Bileşenleri

İlkel malzeme fırına girince sıra ile şu kimyasal olaylar gerçekleşir;

- Malzeme içindeki suyun buharlaşması (100 °C)
- Kildeki bileşim suyunun ayrışması (500 °C). Bu olay sonucu amorf silis, amorf alümin oluşur. Daha yüksek sıcaklık derecelerinde amorf alümin kristale dönüşür.
- Kalsiyum karbonatın ayrışması (900 °C)
- Kireç ile silisin birleşmesi (1200 °C)

Yukarıdaki kimyasal olaylar sonucunda çimentoyu oluşturan elemanlar fırında birbirleri ile birleşerek karmaşık bileşimler (karma oksitler) meydana getirirler. Bu karmaşık bileşimlerin en önemlileri, silisin kireçle birleşmesi neticesinde oluşan kalsiyum silikatlar ile alüminin yine kireçle birleşmesi neticesinde oluşan kalsiyum alüminatlardır. Meydana gelen oluşumları incelemek için metal alaşımlarında olduğu gibi faz (denge) diyagramlarından yararlanır. Silisin kireçle birleşmesi sonucu 4 çeşit kalsiyum silikat oluşur. Bunların kimyasal formülleri ve kısa gösterimleri aşağıda verilmiştir;

- $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  :  $\text{C}_3\text{S}$ , Tri kalsiyum Silikat
- $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  :  $\text{C}_2\text{S}$ , Di kalsiyum Silikat
- $\text{CaO}_2.\text{SiO}_2$  :  $\text{CS}$ , Kalsiyum Silikat
- $3\text{CaO}.2\text{SiO}_2$  :  $\text{C}_3\text{S}_2$ , Tri kalsiyum Bi Silikat

Bunlardan kalsiyum silikat ve tri kalsiyum bi silikat priz yapmamaları nedeni ile çimento bakımından önemli değildir.  $\text{C}_3\text{S}$  çimentonun prizini çabuklaştırması ve hızlı dayanım kazanmasına neden olduğundan önemlidir.  $\text{C}_2\text{S}$  ise çimentonun yavaş sertleşip, bir haftadan sonra dayanım kazanmasına neden olur. Çimento fırınında yüksek sıcaklığın etkisi ile alüminin kireçle birleşmesi sonucunda, aşağıda formülleri ve kısa gösterimleri verilen 4 çeşit alüminat oluşur.

- $3\text{CaO}.5\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A}_5$  Tri Kalsiyum Penta Alüminat
- $\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CA}$  Kalsiyum Alüminat
- $5\text{CaO}.3\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_5\text{A}_3$  Penta Kalsiyum Tri Alüminat
- $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A}$  Kalsiyum Alüminat

$\text{C}_3\text{A}_5$  çimentonun yavaş fakat sürekli dayanım kazanmasına,  $\text{CA}$  ise su ile enerjik ve hızlı bir reaksiyon yaparak katılaşmasına ve hızlı dayanım kazanmasına sebep olur.  $\text{C}_5\text{A}_3$ 'ında prize katkısı olduğu belirtilmektedir.  $\text{C}_3\text{A}$  su ile kuvvetli reaksiyon yaptığından, çok ısı çıkarır. Miktarı fazla olursa suyun buharlaşmasına neden olacağından çimentonun hidrasyon olayına zararlı olabilir. Ancak çimentoya hızlı dayanım kazandırır.  $\text{C}_3\text{A}$  değeri düşük olan çimentolar özellikle sülfatlı zeminler için uygundur.

$\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  v.b. maddeler cüzi oranda bulunurlar. Bu bileşimler görüldüğü gibi kalker ve kilden farklı yapıdadır. Su ile karıştırıldıklarında su molekülleri ile birleşerek hidrate olmaya ve kristal yapıya dönmeye hazırdırlar ve her birinin hidrasyonu farklı hızdadır.

Hidrate ürünler de farklı niteliktedir. Termodinamik yönden çimentodaki karma oksitler fırından aldıkları yüksek ısı nedeni ile yüksek entropiye sahiptirler. Su ile



kariştırıldıklarında bu gizli enerjiyi açığa çıkarırlar ve hidratlaşmaları ekzotermik (ısı çikaran) türde meydana gelir. Bu ekzotermik davranış teknolojik uygulama açasından sakıncalar doğurur, çatlamalara neden olur (Aydın 2006).

### **4.3 Çimento Çeşitleri**

#### **a) Portland Çimentosu ve Katkılı Portland Çimentosu**

Portland çimento klinkerinin alçıtayı ile % 10'a kadar herhangi bir doğal yada yapay puzolanik madde ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen bir hidrolik bağlayıcıdır.

#### **b) Yüksek Fırın Cüruf Çimentoları**

Ani soğutma ile granüle haline getirilmiş bazik yüksek fırın cürufuyla portland çimento klinkeri ve alçıtasının belirli oranlarda kariştırılarak öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

#### **c) Tras Çimentosu**

Ağırlıkça % 20-40 oranında kurutulup öğütülmüş tras ve portland çimento klinkerinin bir miktar alçıtayı ile birlikte öğütülmesinden oluşan hidrolik bağlayıcıdır.

#### **d) Beyaz Portland Çimentosu**

Kireçtaşı ile pişirildiğinde beyaz olan kaolen yada profillit ile bir miktar alçıtasının birlikte öğütülmesi sonucu oluşan hidrolik bağlayıcıdır.

#### e) Harç Çimentosu

En az % 40 portland çimentosu klinkeri ile çözünmeyen kalıntı miktarı en çok % 50 olacak şekilde doğal puzolanlar ve uçucu kül gibi çeşitli maddelerin bir miktar alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır.

#### f) Sülfatlı Cüruf Çimentosu

Alüminyum içeriği fazla olan yüksek fırın cürufunu % 80, portland çimentosu klinkerini % 5 ve alçıtaşı da % 15 oranlarında içerir.

Ayrıca uçucu küllü çimento (TS 640) ve erken dayanımı yüksek çimentolar da sektör kapsamına giren ürünlerdir (DPT 2434, 1996).

### 4.4 Bağlayıcı Maddenin Bileşenleri

Kalker,  $\text{CaCO}_3$  olup fırında pişirilmesi sonucu  $\text{CaO}$  denilen kireç meydana gelir. Kil denilen malzeme çok karışık bir yapıya sahip olmakla beraber içinde fazla miktarda kaolinit bulunmaktadır.  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , formülüne sahip olan kaolinit yüksek sıcaklıkta ayrışması sonucu alümin  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve silis  $\text{SiO}_2$  meydana gelir. Killerde genel olarak bir miktar demir oksit  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  daima bulunur.

#### 4.4.1 Bağlayıcı Maddelerin Elemanları

Bir bağlayıcı maddede ve özellikle portland çimentosunda bulunan belli başlı elemanlar kireç, silis, alümin ve demir oksittir.

**a) Kireç:** Daha öncede belirtildiği gibi  $\text{CaCO}_3$ 'ün  $900\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstünde pişirilmesi ile elde edilir. Amorf bir görünüme sahip beyaz bir cisimdir.  $2570\text{ }^\circ\text{C}$ 'de ergimeye ve  $2580\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kaynamaya başlar. Kireç bir bazdır. Silis, alümin ve demir oksitle birleşme özelliği vardır.

Kireç bağlayıcı maddelerin en önemli elemanıdır. Portland çimentosunun % 60-67'sini teşkil eder. Gerek portland çimentosunda ve gerek diğer çimentolarda kireç, silis ve alüminle birleşerek silikatları ve alüminatları meydana getirirler. İşte bu silikatlar ve alüminatlar çimentolara bağlayıcılık özelliğini kazandırmaktadır.

Kirecin çimentoda tamamen silikat ve alüminat halinde bulunması gerekir. Aksi takdirde çimentoda birleşmemiş kirecin (sönmemiş kireç, CaO) bulunması çimento için çok zararlıdır.

**b) Silis (SiO<sub>2</sub>):** Silisin normal sıcaklıkta başka maddelerle birleşme özelliği yoktur. Buna karşılık yüksek sıcaklıkta asit oksit halini alarak başka elemanlarla birleşerek özelliğini kuvvetli bir şekilde kazanır. Bu özelliği sayesinde ki kireçle birleşerek silikatları meydana getirir. Bundan başka yine silis basınç altında ısıtılırsa su karşısında kireçle birleşme kabiliyeti ve silikatları meydana getirme özelliğine sahiptir.

**c) Alümin (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Doğada renksiz korendon (corindon, trigonal sistemde sertleşen alüminyumun oksidi) halinde bulunur.

Alümin 2000 °C civarında ergir. Alümin belirli bir şekilde ergiticilik özelliği vardır. Bunun bir sonucu olarak alüminin bulunması sayesinde silikatlar daha düşük sıcaklık derecesinde meydana gelebilirler. Alümin portland tipi çimentolarda % 4 - % 7 oranında bulunur. Buna karşılık alüminli çimentolarda yaklaşık olarak % 40'dır.

**d) Demir oksit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):** Çimentolarda az miktarda bulunan bu madde kristal yapıya sahiptir. Pişirme esnasında hem kireçle hem de alüminle birleşerek Triksiyum Alümino ferriti oluşturur. Çimentonun gri renkte olmasının sebebi de yine demir oksittir. Bu nedenle beyaz çimentolarda bu madde bulunmamaktadır. Demir oksidin alüminden daha yüksek bir ergiyiciliğe sahiptir.

## 5. KİREÇ

Kireçtaşının ( $\text{CaCO}_3 - \text{CaMg}(\text{CO}_2)_2$ ) çeşitli derecelerde ( $850-1400 \text{ C}^\circ$ ) pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında tipine göre hava veya suda katılma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bir bağlayıcı türü olup özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kireç özellikleri (Eriç 1994).

Kireç Çeşidi		Bileşimdeki Kil Oranı (%)	Fiziksel Özellikler $\text{gr/cm}^3$			Mekanik Özellikler $\text{N/mm}^2$	
			Birim Ağırlık	Özgül Ağırlık	Katılma Süresi	$\sigma_{\text{Basınç}}$	$\sigma_{\text{Çekme}}$
Hava Kireci	Yağlı Beyaz	0	0,6	2,2	-	0,7	-
	Gri, Zayıf (Dolomitli)	0-2	0,75	2,4	-	-	-
Su Kireci	Kuvvetli	15-19	0,7	2,7	2-7 gün	1,5	0,3
	Normal	19-22	0,8	2,8	24-48 saat	6-8	0,9

Kireci, içindeki kil miktarına bağlı olarak, yalnız havada katılma gösteren hava kireci (yağlı kireç) ve hem havada hem de suda katılma özelliği gösteren su kireci (hidrolitik kireç) olmak üzere iki tipe ayırmak mümkündür.

Ayrıca piyasada, üretim yöntemine göre sınıflandırılmış; çalı kireci, kömür kireci, mermer kireci ve esmer kireç olmak üzere dört çeşidi mevcuttur.

Kireç bilinen en eski bağlayıcılardan biridir. Eski Babil, Mısır, Finikeliler, Hitit ve Persler tarafından hava kireci yapıda bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Romalılar devrinde su kireci bulunmuş ve su içi inşaatlarında kullanılmıştır. Bu arada Puzolan Kireç (volkanik esaslı, killi, kalkerli toprak) ile, Türkler tarafından da tuğla kırıkları (pişmiş kil) öğütülüp kireçle karıştırılarak “Horasan harcı” adı altında kullanılmıştır. Ayrıca bu tür bağlayıcı Mısır’da Homra, Hindistan’da Surkhi adı altında bilinmektedir. Bizans’ta ise kireç sıva fresk tekniği altında uygulanmıştır. Ortaçağda bu sanayide daha fazla bir ilerleme görülmez.

IX-XII. yüzyılda puzolan bile Avrupa'da kaybolmuştur. Smeathon (Ing.) 1756 yılında bir deniz feneri yaparken killi bir kireci pişirerek su kireci ve hidrolitik bağlayıcı fikri üzerinde önemli adımlar atmıştır. Bu başlangıç sonradan çimentonun gelişmesi için de önemli rol oynamıştır. Günümüzde kireç; sıva, bağlayıcı boya malzemesi, gazlı beton ve özellikle plastik endüstrisinde hammadde olarak önemini korumaktadır.

Kireç taşları ocaktan çıkarılıp belli büyüklükte kırıldıktan sonra kömürle tabakalar şeklinde istif edilerek meydana getirilen yığınlar halinde veya fırınlarda (aralıklı veya çalışan kule tipi) yapılan pişirilme sonucu sönmemiş kireç olarak elde edilir. Piyasada üretim yönetimine göre sınıflandırılan çalı kireci, alevli ateşte pişirilmiş (1000 C°), söndürülmesi kolay; kömür kireci kömürle pişirilmiş (1400 C°), söndürülmesi zor kireçlerdir.

Mermer kireci, hammaddesi saf ve diğerlerine oranla daha fazla miktarda sönmüş kireç veren; esmer kireç ise içinde % 10 yabancı madde bulunan (dolomit kireci,  $\text{CaMg}(\text{CO}_2)_2$ ) kireç türleridir.

Sönmemiş kireç üretim yerinde ve şantiyede suyla söndürülerek kireç kaymağı veya toz halinde yapıda kullanılacak hale getirilir.

Söndürülme işlemi sırasında parçaların (Grapye'li kireç), daha sonra yapıda uygulanan sıva yüzeyinde sönmesini tamamlayarak hacim genişlemesi sonucu patlamalara ve dökülmelere sebep olacağı için dikkatle ayrılması gereklidir. Kireci sönme işleminin tamamlanması için kuyuda bekletme süresi önemlidir. Yapıda duvar harcı olarak kullanılacak kirecin en az bir hafta, sıva harcı olarak kullanılacak kirecin ise en az 2-3 hafta kuyuda bekletilmesi gerekir. Kuyunun üst yüzeyini kumla kapatarak, sönmüş kirecin havadan  $\text{CO}_2$  olarak sertleşmesini önlemek mümkündür.

Hava kireçlerinin bünyesinde reaksiyon kabiliyeti olan  $\text{CaO} + \text{MgO}$  miktarı % 80'den fazla (beyaz kireçte  $\text{MgO}$  % 6) olmalıdır. Ancak dolomitli kireçte  $\text{MgO}$

miktarı % 4'ten büyük olabilir. Su kirecinde ise reaksiyona giren CaO + MgO miktarı % 45-60 oranındadır.

İncelik kirecin suyla hidratasyona girmesinde önemli rol oynayan bir husustur. Hava kireçlerinin katılma özelliği göstermesi, bünyesine CO<sub>2</sub> alarak kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) şeklinden kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) haline dönüşme olayıdır. Bu olayda havayla temas eden yüzey şekli ve kalınlık önem kazanır. Hava kireçlerinin diğer bir özelliği ise suda erimesidir (1 litre suda 1.3 gr). Su kirecinin katılması ise çimentonun katılmasına benzeyen bir kristalleşme sonucudur.

Kil içinde bulunan silisin kireçle birleşmesi sonucunda kalsiyum silikat (2CaO.SiO<sub>2</sub>) meydana gelir. Bu nedenle su kireçleri sudan etkilenmeyen ve su içinde katılma özelliği gösteren bir kireç türüdür.

Genellikle kireçlerin diğer bir özelliği de kargir malzeme ile yüksek aderans göstermesi ve deformasyon kabiliyetlerinin üstünlüğüdür. Bu nedenle kireç harçları plastik bir bünyeye sahip olduklarından işlenebilme ve yerleşme özellikleri yüksek değerdedir.

Kireç harcı yapımında beyaz kireç, ağırlığının % 75'i, dolomitli kireç % 65'i, su kireci % 50'si oranında suya ihtiyaç gösterir.

Kireci kullanmadan önce kuyuda bekletme ve dinlendirme sürelerine kesinlikle uyulması gerekir.

Kireç badana yapımında aderansı artırıcı özellik sağlamak amacıyla bazı katkı maddeleri (tutkal, zeytinyağı, tuz vs.) ilave etmek mümkündür. Hava ve su kireçlerinin hacim artışlarının zararlı etkilerini azaltmak üzere kumla karıştırılarak tabakalar halinde kullanılması CO<sub>2</sub> gazının nüfuzu için gereklidir. Kalın tabakaların iç kısımları havadan CO<sub>2</sub> alamadıkları için sertleşmezler. Hava kireçleri yapı içinde suya maruz olmayan yerlerde, su kireçleri yapı dışında ve su

içinde kullanılabilir niteliktedir. Ülkemizin çeşitli yerlerindeki kireç ocaklarından elde edilen kireç piyasada sönmemiş kireç (m<sup>3</sup>) veya sönmüş toz kireç (kg) olarak bulunur (Eriç 1994).

### 5.1 Kirecin Sınıflandırılması

Kirecin hammaddesi olan kireçtaşı veya kalker, genellikle kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) dan oluşur. İçindeki kalsiyum karbonat oranını baz olarak yapılan klasifikasyona göre kireçtaşı cinsleri şöyle sıralanır:

- 1.Çok yüksek kalsiyumlu kireçtaşı (KT) : CaCO<sub>3</sub> : min. % 97
2. Yüksek kalsiyumlu KT : CaCO<sub>3</sub> : min. % 95
- 3.Yüksek karbonatlı KT : (CaCO<sub>3</sub>+MgCO<sub>3</sub>) : min. % 95
4. Kalsitik KT : MgCO<sub>3</sub> : % 5
5. Magnezyumlu KT : MgCO<sub>3</sub> : % 5 - 20
6. Dolomitik KT (Dolomit) : MgCO<sub>3</sub> : % 20 - 40
7. Yüksek magnezyumlu dolomit : MgCO<sub>3</sub> : % 40 - 46

Kireç , en az % 90 CaCO<sub>3</sub> içeren kireçtaşının kireç fırınlarında 900-1000 °C'nin üzerinde kalsinasyonu sonucunda kalsiyum oksite dönüşmesiyle elde edilir. Kalsiyum oksidin ticari adı sönmemiş kireçtir (bazen piyasada parça veya kelle kireç tabiri de kullanılmaktadır).

Kalsiyum oksit, suyla reaksiyona sokulması sonucunda kalsiyum hidroksite veya ticari adıyla sönmüş kirece dönüşür.

Kireçtaşı, sönmemiş kireç ve sönmüş kireçten oluşan ürün grubuna 'kireç ürünleri' adı verilir. Kirecin hammaddesi olan ve doğada bol miktarda bulunan kireçtaşı , karbonatlı tortul kayaç ve fosiller için kullanılan genel bir deyim olup, yapısında prensip olarak kalsiyum karbonat veya kalsiyum karbonat/magnezyum karbonat bileşikleri (CaCO<sub>3</sub>/ MgCO<sub>3</sub>) kombine halde bulunur.

Bunun yanı sıra içinde değişik oranlarda demir, alüminyum, silisyum, kükürt gibi safsızlıklara da rastlanabilir. Dünya’da çok çeşitli formasyon ve tiplerde kireçtaşı mevcuttur. Bunlar orijin, jeolojik formasyon, mineralojik yapı, kristal yapısı, kimyasal bileşim, renk ve sertlik özelliklerine göre gruplandırılır (Örneğin; tebeşir, marn, traverten gibi) (DPT 2615, 2001).

### 5.1.1 Yapılarda Kullanılan Söndürülmemiş Kireçler

Yapılarda kullanılan söndürülmemiş kireçler Çizelge 5.2’de verilen bileşimlerine göre 5 sınıfa ayrılır. Bunlar:

1. Kalsiyum Kireci 90 KK 90
2. Kalsiyum Kireci 80 KK 80
3. Kalsiyum Kireci 70 KK 70
4. Dolomit Kireci 85 DK 85
5. Dolomit Kireci 80 DK 80

Çizelge 5.2 Kirecin kimyasal özellikleri (DPT 2615, 2001).

ÖZELLİKLER	SINIFLAR				
	KK90	KK80	KK70	DK85	DK80
CaO +MgO % kütlece, En az,	90	80	70	85	80
MgO % kütlece	=<5	=<5	=<5	>=30	>5
CO <sub>2</sub> % kütlece, En az,	4	7	12	7	7
Asitle çözünmeyen madde (SiO <sub>2</sub> dahil) % kütlece, En az,	2	2	2	2	2
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metal Oksitleri)(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) % kütlece, En az,	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
SO <sub>3</sub> % kütlece, En az,	2	2	2	2	2

### 5.1.2 Yapılarda Kullanılan Söndürülmüş Kireçler

Yapılarda kullanılan söndürülmüş kireçler Çizelge 5.3’de verilen kimyasal bileşimlerine göre 5 sınıfa ayrılır. Bunlar;



1. Kalsiyum Kireci 90 S-KK 90
2. Kalsiyum Kireci 80 S-KK 80
3. Kalsiyum Kireci 70 S-KK 70
4. Dolomit Kireci 85 S-DK 85
5. Dolomit Kireci 80 S-DK 80

Çizelge 5.3 Kirecin kimyasal özellikleri (DPT 2615, 2001).

ÖZELLİKLER	SINIFLAR				
	S-KK90	S-KK80	S-KK70	S-DK85	S-DK80
CaO +MgO % kütlece, En az,	90	80	70	85	80
MgO % kütlece	=<5	=<5	=<5	>=30	>5
CO <sub>2</sub> % kütlece, En az,	4	7	12	7	7
Asitle çözünmeyen madde (SiO <sub>2</sub> dahil) % kütlece, En az,	2	2	2	2	2
R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Metal Oksitleri)(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) % kütlece, En az,	1	1	1	1	1
SO <sub>3</sub> % kütlece, En az,	2	2	2	2	2

Not: Bu değerler nem ve bağlı su miktarları düşüldükten sonraki durum içindir (DPT 2615, 2001).

## 5.2 Kirecin Hammaddeleri

### 5.2.1 Kalker (Kireçtaşı)

Kimyasal bileşiminde asgari %90 kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) bulunan tortul kayalara kalker ya da kireçtaşı adı verilmektedir. Ayrıca mineralojik bileşiminde asgari %90 kalsit minerali bulunan kayalara da kalker adı verilmektedir.

### 5.2.2 Dolomitik Kireçtaşı

Kimyasal bileşiminde kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) yanında kütlece %10-%35 oranında magnezyum karbonat (MgCO<sub>3</sub>) bulunan tortul kayalara dolomitik kireçtaşı adı verilmektedir (DPT 2434, 1996).

## 5.3 Kireç Çeşitleri

### 5.3.1 Kireç (Hava Kireci)

Kireçte alçı gibi çok eski bir bağlayıcıdır. Kireç sadece havada dayanım kazanır, suya dayanıksızdır. Düşük mukavemetlidir.

Kireç veya yağlı kireç kalker taşı, tebeşir v.b. gibi  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) kökenli kütlelerin veya dolomit gibi  $\text{CaCO}_3$  ,  $\text{MgCO}_3$ ‘dan oluşan kütlelerin 900 °C’nin üstünde pişirilmesi ile aşağıdaki reaksiyona göre meydana gelen ayrışma sonucunda elde edilir.

Eğer kireç tamamen söndürülmeden yapılarda kullanılırsa, söndürme olayı yapıda tamamlanır ki, bu durum bir hacim artmasına buda kirecin kullanıldığı yerlerde çatlaklar, döküntüler, kabuklaşmalar meydana getirir.

Kirecin sertleşmesi olayı üç aşamada olur;

- 1 Koruma,
- 2  $\text{Ca(OH)}_2$  formülünde kristalleşme,
- 3 Karbonatlaşma (havanın  $\text{CO}_2$  ile birleşerek)

Koruma ve kristalleşme geçicidir. Su ile karıştırılınca kireç tekrar yumuşar. Asıl sertleşme karbonatlaşma sonucudur;

Kireç havada sertleşen bir bağlayıcıdır. Kireç harcı düşük dayanımlı, suya dayanıksız ve su içinde çözüldüğünden kireç tek başına bağlayıcı olarak kullanılmaz, muhakkak çimento ile kullanılır. Kirecin sıva ve duvar harcında çimento ile kullanılmasının bazı yararları vardır.

Kireç sayesinde malaya yapışmayan, duvara yapışan ve perdelanma esnasında çatlamaayan bir sıva elde edilir. Kireç hakkında bilinmesi gereken başka bir durum

kirecin kaynatılması halinde suda eriyikliğinin azalmasıdır. Kalorifer kazanlarının ve borularının tıkanmasındaki neden kirecin bu özelliğidir.

Kirecin özgül ağırlığı : 2,2-2,45 g/cm<sup>3</sup> arasındadır.

Kirecin birim ağırlığı : 0,6-0,75 g/cm<sup>3</sup>, dır.

### 5.3.2 Su kireci

Su kireci içinde % 10 - % 25 kil bulunan kalkerin pişirilmesi ile elde edilir. Bu pişirme sonunda kalkerin ayrışması sonucu meydana gelen kireç kilin içinde bulunan silis ve alüminle birleşir. Bu bağlayıcı maddelerin toz haline getirilmesi öğütme ile değil doğrudan doğruya kirecin söndürülmesi ile sağlanır. Fırından çıkan parçalar su ile temas ettirildiği takdirde kirecin yaptığı reaksiyon sonda meydana gelen hacim artışı bunların ince toz haline geçmesine neden olur. Bu olayın vuku bulması için su kirecindeki CaO miktarının %10'dan büyük olması gerekir ki bu şart hemen hemen her zaman yerine gelmektedir.

TS 30 (1977)'a göre CaO + MgO su kirecinin % 45 - % 60'ını oluşturmalıdır. Bu bağlayıcı madde, SiO<sub>2</sub>.2CaO karmaşık bileşenini içinde bulundurmasından dolayı su içinde katılaşabilir ve sertleşir. Bu nedenle su yapılarında da kullanılabilir. Yağlı kirecin 28 günlük basınç dayanımı 7 kgf/cm<sup>2</sup> iken su kirecinin ki 60 kgf/cm<sup>2</sup>' dir. Birim ağırlığı: 0,78-0,8 gr/cm<sup>3</sup>, özgül ağırlığı: 2,7-2,8 gr/cm<sup>3</sup>'dür (Aydın 2006).

## 6. KİMYASAL KATKILAR

İnsanın yapı teknolojisinde bağlayıcı madde kullanmasıyla kimyasal katkı araştırması hemen hemen eş zamanlıdır. Kimyasal katkılar üzerinde tarayabildiğimiz ilk yayın 1924 yılında ASTM karışım dergilerinde çıkan Abrams'ın bir çalışması ve önerisidir. Beton teknolojisinin ünlü kurucularından olan Abrams Kalsiyum Klorür'ün priz ve sertleşmeyi hızlandıran bir kimyasal katkı olduğunu yazmıştır. İlginç bir yaklaşım olarak, günümüzde bu katkıdan öylesine korkuluyor ki, her üretici firma, ürünlerini takdim ederken klor içermez deyimini muhakkak kullanmaktadır.

20. yüzyıl başlarında beton teknisyenleri betonun iki ana işlevinin işlenebilme ve dayanım, ve dayanımı etkileyen faktörün su/çimento olduğunun bilincindeydiler. Diğer üçüncü ana işlev olan dayanıklılık yani durabilite pek dikkate alınmıyordu. Su/çimento faktörü, işlenebilme ve dayanım özellikleri arasındaki can sıkıcı çelişkili durumu yaratıyordu. Suyu artırıncı beton kolay işlenebilir, ancak dayanım düşer, dayanımın düşmemesi için çimentoyu arttırmak da şarttır. Böylece çözüm ekonomik olmaktan çıkar. İşte bu yüzden suyu arttırmadan işlenebilmeyi düzelten bir katkı bulunmalıdır. Su azalınca, su/çimento oranı da dayanım açısından sabit tutulunca, beton daha az çimento sarf ederek üretilebilir ve ekonomi sağlar. Bu mantık akışkanlaştırıcı katkıların bulunmasının, icat edilmesinin ana nedeni olmuştur (Akman ve Akçay 2005).

Kimyasal katkılar, çimento tanelerinin zeta potansiyel değerinin negatifliğini arttırarak çimento tanelerinin daha iyi dağılmasını sağlar. Bu artışın çimentonun kimyasal kompozisyonuna da bağlı olduğu yapılan çalışmalarla doğrulanmıştır.

Katkının adsorblanma miktarı ve hızı, katkının moleküler ağırlığı ile artmaktadır. Ancak, yapılan bazı araştırmalar molekül ağırlığındaki artışın bir noktaya kadar işlenebilirliği arttırdığını, daha sonra etkilemediğini hatta azalttığını göstermiştir (Aydın vd. 2005).

Betonun birtakım özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton içerisindeki çimento miktarı baz alınarak belli oranlarda katılan organik veya inorganik kökenli kimyasallar katkı maddesi olarak adlandırılırlar. Katkı maddeleri çoğunlukla beton karışım suyuna katılır. Gereğinden fazla kullanıldığında aksi etkiler oluşturabileceği gibi yine gereğinden az kullanıldığı takdirde hiç bir faydası olmayabilir. Ancak şunun iyi bilinmesi gerekir ki kurallara uygun üretilmeyen bir betonun özelliklerini katkı maddeleri ile iyileştirmek mümkün değildir. Kurallarına uygun üretilen betonların da katkı maddeleri ile uyumu önceden yapılan deneylerle belirlenmelidir.

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkı maddeleri aşağıda belirtildiği şekilde gruplandırılır.

a) Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları;

Bu guruba giren katkıları çoğunlukla çimento ağırlığının % 0.2-0.5 arası oranlarda kullanılır. Taze betonun işlenebilirliğini arttıran bu katkıları aynı zamanda beton karma suyu ihtiyacını azalttıklarından betonun dayanımını da arttırlar.

b) Süperakışkanlaştırıcıları;

Daha çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan bu katkıları betonun su/çimento oranını 0.25'lere düşürmek olanaklıdır. Ancak süper akışkanlaştırıcıları normal akışkanlaştırıcılara kıyasla % 1 - % 3 gibi çok daha yüksek dozajlarda kullanılır.

c) Priz süresini değiştiren kimyasal katkıları;

Taze betonun priz adı verilen sertleşme sürecinin bazı koşullarda hızlandırılması veya geciktirilmesi istenir. Özellikle yaz aylarında, uzun taşıma mesafelerinde priz geciktiriciler, kış aylarında ise priz hızlandırıcıları kullanılır.

d) Hava sürükleyici kimyasal katkılar;

Soğuk iklim koşullarında donma-çözülme tehlikesine karşı koruyan bu maddeler, aynı zamanda betonun işlenebilirliğini arttıırırlar.

e) Antifrizler;

Bu tip katkılar beton içindeki suyun donma sıcaklığını düşürerek suyun donmasını ve betonun çatlamasını engeller. Ancak soğuk hava şartlarında betona sadece antifriz katkı ilave edilmesi kesin çözüm olmayıp döküm yerinde betonun korunması için özel önlemlerin alınması gereklidir.

f) Diğer katkılar;

Hafif beton, geçirimsiz beton, rötreyi önleyici, aderansı artırıcı, renklendirici, su tutucu, su geçirimsizlik vb değişik kimyasal katkı maddeleri vardır ([www.betonsa.com](http://www.betonsa.com)).

**Beton Katkılarının Özellikleri:**

Yüksek dayanımlı betonlar gibi özel betonların dışında maksimum dozaj TS EN 206 (2002) tarafından 5.2.6. maddesinde çimento kütlesine göre 50g/kg olarak sınırlandırılmıştır. 2g/kg'dan daha düşük dozajlarda kimyasal katkı suya karıştırılarak eklenmelidir.

Beton katkılarının performansı TS EN 934-2 (2002) tarafından tek fonksiyonlu katkıların ana fonksiyonlarına ve çift etkili katkıların ana ve ikincil fonksiyonlarına göre kontrol edilir. Bu performans şartları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Bu genel performans şartlarına ek olarak tüm kimyasal katkılara uygulanan genel şartlar bulunmaktadır. Bunlar;

- Priz süresine etkisi
- Basınç dayanımına etkisi
- Betonun hava içeriğine etkisi
- Suda çözünebilen klorür miktarı
- Na<sub>2</sub>O eşdeğeri alkali miktarı

Kimyasal katkıların performansı referans betona göre belirlenir. Deney karışımı (kimyasal katkılı) kontrol karışımıyla (katkisiz) kıyaslanır . Klor ve alkali içerikleri de ölçülerek beyan edilir. Katkılar için deney prosedürleri TS EN 480 (2001) Kimyasal Katkılar – Beton , Harç ve Şerbet için - Deney Metodları serisinde belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 Kimyasal katkı tipleri (analiz.byethost17.com).

Kimyasal Katkı Tipi	Performans Şartı	TS EN 934-2'deki değeri
Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı katkılar	Eşit kıvamda su azalması.	azalma $\geq$ %5
Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı katkılar	Eşit kıvamda su azalması, Eşit su/çimento oranında kıvam artışı.	azalma $\geq$ %12 çökme artışı $\geq$ 120mm
Su tutucu katkı	Kusmada azalma.	azalma $\geq$ %50
Su geçirimsizlik katkısı	Kapiler emmede azalma.	Kütlece azalma $\geq$ %50
Hava sürükleyici katkı	Sertleşmiş betonda hava boşluğu özellikleri.	Açıklık faktörü $\leq$ 0.200 $\mu$ m
Priz hızlandırıcı katkı	İlk priz süresinde azalma.	Azalma $\geq$ %40, 5°C'de
Sertleşmeyi hızlandırıcı katkı	1. gündeki basınç dayanımı, 2. gündeki basınç dayanımı.	Artış $\geq$ %20, 20°C'de Artış $\geq$ %30, 5°C'de
Priz geciktirici katkı	İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış.	priz alma artış $\geq$ 90 dakika priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz geciktirici / su azaltıcı /akışkanlaştırıcı katkılar	Eşit kıvamda su azalması, İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış.	azalma $\geq$ %5 priz alma artış $\geq$ 90 dakika priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz geciktirici/ yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkılar	Eşit kıvamda su azalması, Eşit su/çimento oranında kıvam artışı, İlk priz alma ve priz bitiş sürelerinde artış.	azalma $\geq$ %12 çökme artışı $\geq$ 120mm priz alma artış $\geq$ 90 dakika priz bitiş artış $\leq$ 360 dakika
Priz hızlandırıcı/ su azaltıcı/akışkanlaştırıcı katkılar	Eşit kıvamda su azalması, İlk priz alması süresinde azalma.	azalma $\geq$ %5 azalma $\geq$ 30 dakika, 20°C'de ve $\geq$ %40 5 °C 'de

Betonda bulunabilecek maksimum klorür içeriği TS EN 206-1 'de belirlenmiştir ve kimyasal katkıların bu miktara katkısı hesaplanabilir. TS EN 934-2 maksimum klorür içeriğini % 0.1 veya üreticinin beyanıyla sınırlandırmıştır.

Maksimum alkali madde içeriği TS EN 934-2 (2002)'ye göre üretici tarafından her kimyasal katkı için beyan edilmelidir. Kimyasal katkıların tipi, performans şartları ve standarttaki değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir (analiz.byethost17.com).

### **6.1 Akışkanlaştırıcı Katkılar**

Akışkanlaştırıcılar kimyasal katkıları içerisinde uygulamada en çok kullanılan ve en çok bilinen katkıları grubunu oluştururlar. Normal akışkanlaştırıcıların kimyasal içerik bakımından çeşitli tipleri vardır. Ancak bu katkıların çoğunluğu kağıt üretiminde yan ürün olan sodyum ve kalsiyum linyosüfonatlardır (Yazıcı 2002).

Akışkanlık arttırmak üzere ilk olarak doğal reçineler, ağaç reçinelerinden çıkarılan yağlar (tall yağı), sülfane sabunlar denenmiştir. Bu çabalar kağıt üretiminde ortaya çıkarılan lignin likörünün sülfonasyonu ile elde edilen sodyum veya kalsiyum linyosülfanat'ın (LS) üretimiyle sonuçlanmıştır.

LS'ler doğal bir makromolekülden oluşur, aniyotik  $SO_4^-$  ucuyla hidrofobik bir nitelik taşırlar, çimento taneciklerine adsorbe olarak tutunur ve hidrasyon sürecinde katı taneciklerin flokülleşmesini önlerler. Ayrıca arayerde oluşan hava kabarcıklarının küresel yapılarının korunmasını sağlarlar. Bu hava sürüklenme etkisi sürekliliğini yeterli düzeyde koruyamaz. Hammaddenin odun oluşu nedeniyle LS'ler glüköz (şeker) da içerirler. Şeker ise prizi geciktiren çok kuvvetli bir katkıdır (Akman ve Akçay 2005).

Akışkanlaştırıcılar hava sürükleyerek, çimento tanelerinin topaklaşmasını önleyerek ve taneleri beton içine dağıtarak etkili olurlar. Böylece çimento



tanelerinin bütünüyle hidrate olmasına sebep olurlar ve suyun yüzey gerilimi azaltır ıslatma gücünü artırır (Yazıcı 2002).

Geciktirici işlevi ve hava sürüklenme niteliği olan LS'ler uzun yıllar tek akışkanlaştırıcı beton katkısı olarak kullanılmıştır. Kimyasal açıdan en önemli özelliği makromolekülünün ucundaki  $SO_4^-$  radikali oldu, daha sonraki yıllarda bulunan ve etkinliği çok daha yüksek olan sentetik akışkanlaştırıcı katkılarda bu sülfone yapı daima mevcuttur (Akman ve Akçay 2005).

Betonyerde çepelere yapışma olmaz, betonda agrega tanelerinin ayrışması minimum düzeye iner. Çimento hamuru ve agrega bağlantısı düzelir.

Akışkanlaştırıcılar genelde üç amaç için kullanılırlar

- Katkısız betonla aynı işlenebilmede olmak şartıyla su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet kazanmak,
- Kütle betonlarda hidrasyon ısısını düşürmek için çimento miktarının azaltılması durumunda aynı işlenebilirliği kazanmak (Katkının bu şekilde diğer beton türleri içinde kullanılması aynı zamanda daha ekonomik bir beton üretimi sağlaması anlamına gelmektedir),
- Kolay yerleşmeyi sağlamak için (özellikle ulaşılamayan köşelerde) işlenebilmeyi artırmak,

Akışkanlaştırıcıların genel olarak betondaki; olumlu etkileri: sabit işlenebilmede su gereksinimini % 6.5'dan fazla azaltabilir, her yaştaki basınç dayanımını %10'dan fazla artırabilir, daha sıkı bir beton elde ederek donma çözölmeye, agresiv ortama dayanıklılık artar, geçirimsizlik sağlanır, yüzey görünümü düzelir

Olumsuz etkileri: priz gecikebilir, rötne artabilir, çökme kaybı meydana gelebilir (Yazıcı 2002).

Süperakışkanlaştırıcı ve hiperakışkanlaştırıcıların icadı ve gelişmesi ile 1970'lerden sonra sorun olmaktan çıkan, "çok az karma suyu ile yüksek dayanımlı fakat çok kolay işlenebilen beton" üretimi problemi, XX. yüzyılda yeni teknikler, araçlar tasarlanarak çözülmeye çalışıldı. Bunları iki ana grupta toplamak mümkündür. Bunlar: kuru bir betonun işlenebilirliğini artırmak, sulu ve akışkan bir betonun fazla suyunu geri almak (Akman 2005).

Su/çimento oranı düşürülerek dayanımı artırılan, ancak işlenebilme sorunu da halledilmiş bir beton üretebilmek, vibrasyonun bulunması ve geliştirilmesiyle mümkün olmuştur (Eriç 1994).

Vibratörlerin üretim endüstrisi önemli bir iş kolu olarak gelişti. Farklı türde, frekansta ve güçte vibratörler üretildi. Önceleri kalıplara takılan, yüzeye uygulanan vibratörler, vibrasyon masaları, daha sonra da 1926'da Deniau tarafından tasarlanan dalıcı vibratörler yapıldı.

Su/çimento oranı ancak 0.80 olduğunda şişlemeyle yerleştirilebilen betonların su/çimento oranını 0.50'ye düşürerek yerleştirebilmek vibratörle mümkün olmuştur. Daha düşük boşluklu olan bu vibre betonlarda dayanım %40-50 oranında artmıştır. Günümüzde yeni süper ve hiper akışkanlaştırıcılarla vibrasyona gerek kalmadan bu sonuç kolaylıkla elde edilmekte ve kimyasal katkılar vibrasyonun eski parlak başarısını gölgelemiştir.

Bu olumlu gelişmelerin yanında, süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılarak üretilen betonların başlangıçtaki yüksek işlenebilirlikleri kısa süre sonra kaybolabilmektedir (Akman 2005).

## 6.2 Hava Sürükleyici Katkılar

Hava sürükleyici katkıları beton katkı maddeleri arasında apayrı bir sınıf olarak kabul edilir ve incelenirler (Akman ve Akçay 2005).

Hava sürükleyen süper akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin, çimento içeriği düşük olan karışımlarda, yüksek olanlara göre, su emme açısından genellikle daha etkili olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu katkıların hava sürükleyici etkisinin düşük çimento dozajlarında arttığı görülmüştür (Aytaç vd. 2005).

Hava sürükleyici katkı maddeleri ağaç reçine tuzları, sulfone linyit ve sentetik deterjanlardan imal edilmektedir. Suyun yüzey gerilimini azaltarak taze betonda hava kabarcıkları oluşmasını sağlayan bu katkı maddeleri, içerdikleri tansiyoaktif moleküllerin hidrofobik uçlarıyla hava kabarcıklarına ve hidrofobik uçlarıyla da su moleküllerine dokunarak hava kabarcıkları içine suyun sızmasını önler ve böylece sertleşme süresi boyunca hava kabarcıklarının sürekliliğini ve stabilitesini korurlar.

Çimento hamuru içinde homojen düzgün yayılı ve 0,1 mm'den daha küçük çaplı hava kabarcıkları oluşturan bu katkı maddeleri, sertleşmiş betonda donma-çözünme tekrarlarına dayanıklılığını önemli aşamada artırırlar.

Günümüz beton teknolojisi henüz orta ve şiddetli donma-çözünme etkilerine dayanıklı beton üretebilmenin başka bir yöntemini geliştiremediği için, özellikle Kuzey Amerika ve Kuzey Avrupa ülkelerinde üretilen betonların hemen tümünde hava sürükleyici katkı kullanılmaktadır. Donma-çözünme dayanıklılığı açısından en iyi sonuçlar yaklaşık yüzde 4-6 oranlarında sürüklenmiş hava hacmiyle sağlanmaktadır. Kılcal su emmeyi azaltma gibi olumlu etkileri yanında, hava sürükleyici katkıların birim ağırlığı ve dayanımı azaltma gibi olumsuz etkileri de vardır (Güner ve Süme 2000).

## 7. PUZOLANLAR

Puzolanik maddeler, silissi veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Puzolanik maddeler su ile karıştırıldığında kendi kendine sertleşmezler fakat, ince öğütüldüğünde ve suyun mevcudiyetinde normal çevre sıcaklığında çözülmüş kalsiyum hidroksitle ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluşturmak üzere reaksiyona girerler.

Bu bileşikler, hidrolik maddelerin sertleşmesinde oluşan bileşiklerle benzerdir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit ( $\text{SiO}_2$ ) ve alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )'den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranı ihmal edilebilir. Reaktif silisyum dioksit miktarı kütlece % 25,0'den az olmamalıdır (Aydın 2006).

Puzolanik maddeler doğru şekilde hazırlanmalıdır; yani üretim veya teslim durumuna bağlı olarak seçilmeli, homojenize edilmeli, kurutulmalı veya ısıtılardan geçirilmeli ve öğütülmelidir (TS EN 197-1, 2002).

Avrupa'da Romalılar İtalya'daki Roma ve Napoli arasında yer alan puzzuoli kasabası toprağından yararlandılar. Bu toprak camlaşmış volkan dağıydı ve puzolan sözcüğü bu kullanımdan kaynaklanmaktadır. Almanlar puzolana tras derler, ülkemizde de bu deyim yaygındır. Portland çimentosuna puzolan katıldığı zaman çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kireç) ile  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  arasında meydana gelen reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliğini gösterebilir. Reaksiyonlar sonunda  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tespit edilir, başka bir deyimle çözülmüş bir duruma getirilir.

Bir puzolan tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise puzolanik özelliğı o kadar yüksektir. Puzolanik özellik kullanılan puzolanın özgül alanına bağlıdır.

Demek ki bir malzemenin puzolanik özelliğini arttırmak için onu çok ince öğütmek gerekmektedir.

Puzolanlar (traslar) kimyasal olarak  $\text{SiO}_2$  ve az miktarda  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan maddelerdir. Su ile karıştırıldıklarında çamur haline gelir. Kurutulduktan sonra tekrar eski hallerine geri dönerler. Bunlar (puzolanlar) kireçle karıştırılırsa suda çözünmeyen bir kalsiyum silikat tuzuna dönüşürler.

$\text{SiO}_2$  içeren her toprağın puzolan olmayacağı açıktır. Hangi toprağın bu özellikte olduğu aktivite testi yapılarak belirlenir. ASTM C 618-72 nolu standarda göre bir puzolan da  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0,70$  şartı gerçekleşmelidir.

Diğer taraftan CaO miktarı da % 4'ü geçmemelidir. Amorf olması ve aktif olması gerekir. Bu nedenle kimyasal analiz sonuçları ile beraber mekanik deneylerle de maddenin puzolanik olup olmadığı kanıtlanmalıdır.

Puzolanlar kirece katıldıkları gibi üretim sırasında çimentoya da katılırlar. Böylece katkıli portland çimentosu, traslı çimento dediğimiz türde çimentolar elde edilir. Puzolanların çeşitleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 Puzolanların çeşitleri (Aydın 2006).

<b>Doğal Puzolanlar</b>	<b>Yapay Puzolanlar</b>
Volkanik Küller	Pişmiş Kil
Killi Şist	Tuğla veya Kiremit Tozu
Diatomit Toprağı	Uçucu Kül
Pomza Taşı	Yüksek Fırın Cürufu
-	Silis Dumanı

TS 25 (1975)'e göre doğal puzolanlar da aranan kimyasal özellikler.

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  en az % 70 ve CaO < % 4
- MgO en çok %5
- $\text{SO}_3$  en çok %3
- Rutubet en çok %10 olmalıdır (Aydın 2006).

Beton ve harç dayanımlarına yaptıkları katkıdan dolayı, portland çimentosunun icadından çok önce puzolanlar sönmüş kireç ile karıştırılarak beton imalinde kullanılmıştır. Sadece dayanıma katkıda bulunmak amacıyla değil, ekonomik oldukları ve betonun özelliklerine faydalı değişiklikler sağladıkları için de, günümüzde puzolanlar mineral katkı olarak portland çimentosu ile birlikte kullanılmaktadır.

İlk doğal puzolanın, MÖ 1500'ler civarında Yunanistan'da Santorin adasındaki yanardağ patlamasında ortaya çıkan volkanik kül olduğu, ve eski yunanlıların bu külü MÖ 600'ler civarında sönmüş kireç ile karıştırarak inşaat harcında kullanmaya başladıkları bilinmektedir.

Yunanistan, İtalya, Fransa, Almanya, Türkiye, İspanya, A.B.D., Rusya, Çin, Meksika, Japonya, ve Hindistan, doğal puzolan kaynaklarının bulunduğu ülkelerdir. Rusya ve Japonya'da 1930'lardan beri doğal puzolanlar portland çimentosu ile karıştırılarak kullanılmaktadır ve Çin, Hindistan, Türkiye, Brezilya, ve Meksika, önemli miktarlarda doğal puzolan katkılı-çimento kullanan ülkelerdir. A.B.D.'de ilk puzolanlı portland çimentosu 1912'de Los Angeles Akedükü inşaatında kullanılmıştır. O yıllardan günümüze kadar, özellikle su ile irtibatlı yapılarda ve kütleli yapılarda puzolan-katkılı portland çimentosu A.B.D.'de yaygınlıkla kullanıla gelmiştir. Doğal kaynaklı puzolanların bu tür kullanımları Avrupa'da Amerika'da olduğundan daha yaygındır (Karaman vd. 2005).

## 8. MATERYAL ve METOT

### 8.1 Kullanılan Malzemeler

#### 8.1.1 Uçucu Kül

Çalışmada kullanılan uçucu kül; Kütahya ilinde faaliyet gösteren, Seyitömer termik santralinden (STS) elde edilmiştir. STS'ye ait uçucu külün; kimyasal, mineralojik ve morfolojik özellikleri bu bölümde açıklanmıştır.

##### 8.1.1.1 Kimyasal Özellikler

Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10' un altında olması (% 2,49) nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının % 25' in üzerinde (% 39,01) olması nedeniyle de TS EN 197-1' de V sınıfı uçucu kül için istenilen koşullara tamamen uymaktadır.  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  miktarı ortalama, %88,71 olup ASTM C 618' e göre % 70' in üzerinde ve CaO' in % 10' dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

Seyitömer uçucu külü,  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ 'in % 70' in üzerinde olması nedeniyle, TS 639'da istenen şarta uymaktadır.  $SO_3$  değeri TS EN 450 standardında,  $SO_3$  için istenen en fazla % 3 sınırları içinde (% 0,52) kalmaktadır. Düşük kireçli kül olması nedeniyle serbest kireç yüzdesi de % 0,26 olup, standarttaki % 1'lik sınırın altında kalmaktadır (Türker vd. 2003). Seyitömer uçucu külüne ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 8.1'de verilmiştir.

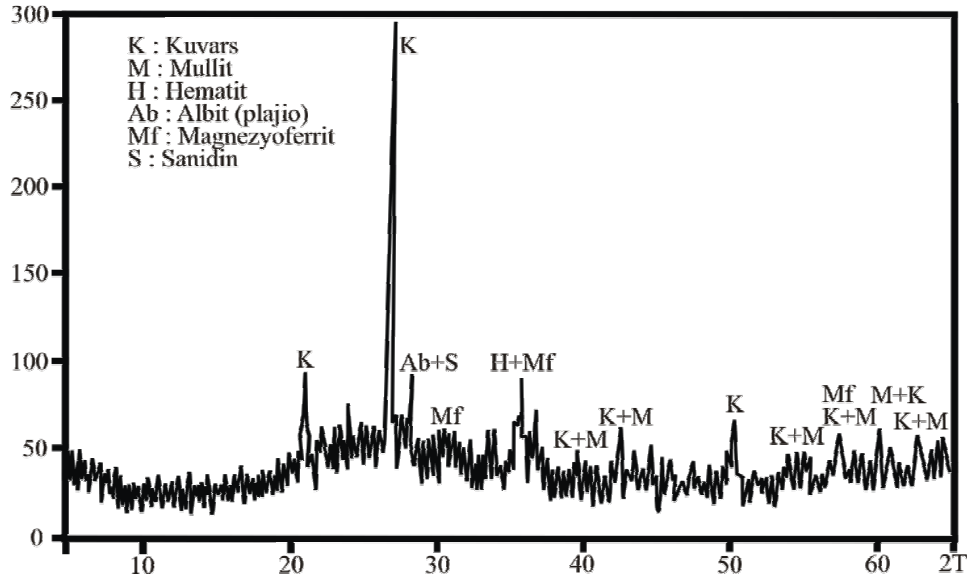
Çizelge 8.1 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları (Türker vd. 2003).

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S+A+F	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl	KK
54,49	20,58	9,27	84,34	4,26	4,48	0,52	2,01	0,65	0,006	3,01

### 8.1.1.2 Mineralojik Özellikler

Seyitömer termik santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 8.1’de gösterilmiştir.

Şekilde görüleceği gibi, uçucu külde başta camsı faz olmak üzere, kuvars, mullit, magnezyoferrit, hematit kristalleri ve minör olarak alkali feldispatlar (albit, sanidin) bulunmaktadır. Seyitömer uçucu külünün, X-ışınları difraktogramında camsı fazın 22-25° 2 $\theta$  arasında maksimum verdiği ve background’un camsı fazca zengin olduğu görülmüştür. Bu durumda camsı fazının kuvars kristalinin maksimum pikine yakın olması nedeniyle silisi karakter taşıdığını gösterir (Türker vd. 2003).



Şekil 8.1. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı (Türker vd. 2003).

### 8.1.1.3 Morfolojik Özellikler

Seyitömer uçucu külü, 1-30  $\mu$ m arasında değişen büyüklüklerde çoğunluğu küresel bazıları düzensiz şekilli olmak üzere farklı morfolojide tanecikler



içermektedir. Özellikle 10 mikronun altındaki taneciklerin içi dolu camsı küreler (solid spheres) halinde olduğu görülmüştür (Türker vd. 2003).

Taneciklere uygulanan mikroanalizde (Türker vd. 2003), bazılarının yüzeyinde magnezyoferrit, hematit biriktiği, masif kütle halinde nadiren rastlanan yapıların alkali feldispat bileşiminde olduğu saptanmıştır. Magnezyoferrit ve hematit demiroksit esaslı bileşenler olup, kömürden gelen piritin oksidasyonu ile oluşan demir oksidin spinel grubunu oluşturan oksitlerle birleşmesi sonucu meydana gelirler.

Taneciklerin HF-asit de çözülmesi sonrasındaki incelemede, çözülmüş camsı yapı, mullit kristalleri ve değişime uğramamış kuvars kristalleri bulunmuştur. Mullit, kaolinit kilinin metamorfizasyonu sonucu oluşmaktadır (Türker vd. 2003).

STS uçucu külüne ait tane boyut analizi değerleri Çizelge 8.2’de verilmiştir.

Çizelge 8.2. STS Uçucu külünün lazer tane boyutu analizi (Demir 2005).

Elek Çapı (µm)	% Geçen	Elek Çapı (µm)	% Geçen
0,5	0,18	46	67
1	1,05	56	72
1,5	1,8	68	77
2	2,43	83	81
2,5	3,75	101	84
4	8	123	87
5	11	150	89
10	22	183	91
20	44	223	94
25	49	272	97
30	55	331	99
37	61	404	100

### 8.1.2 Çimento

Karışımlarda CEM II/B 42,5 R tipi Portland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, TS EN 197-1 (TS, 2002) ve TS EN 197-2 (TS, 2002)’de belirtilen standart değerlere uygun olduğu görülmüştür. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 8.3’de verilmiştir.

Çizelge 8.3 CEM II/B 42,5R portland kompoze çimentosu özellikleri.

Analiz Grubu	DENEY		Sonuç	Sınır Değer
Kimyasal Özellikler	SO <sub>3</sub> (%)		2,91	<3,5
	MgO (%)		2,33	<5,0
	A.Z. (%)		1,92	<4,0
	Cl (%)		0,06	<0,1
	Çözünmeyen kalıntı (%)		0,67	<1,5
Fiziksel Özellikler	Kıvamlilik suyu (%)		30	
	Özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /gr)		3685	>3500
	Priz süresi	Başlama(saat-dak)	2sa.52dak	>1sa
		Sonu(saat-dak)	4sa.36dak	<10sa
	İncelik	No.70de kalan(%)	0,13	
		No.200de kalan(%)	3,15	
	Özgül Ağırlık (kg/dm <sup>3</sup> )		3,07	
	Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	2 gün	26,5	>20
7 gün		38,7	>31,5	

### 8.1.3 Kireç

Bağlayıcı olarak, S-KK 80 T, Afyon Adaçal söndürülmüş kalsiyum toz kireci kullanılmıştır.

### 8.1.4 Akışkanlaştırıcı Katkı

Çalışmada, Chryso fluid optima 200 (Süper akışkanlaştırıcı, yüksek oranda su azaltıcı) kullanılmıştır.

Chryso fluid optima 200, güçlendirilmiş polikarboksilat bazlı yeni jenerasyon bir süper akışkanlaştırıcıdır ve teknik özellikleri ile kullanım alanları Çizelge 8.4'de verilmiştir. Düşük su/çimento oranında yüksek işlenebilirlikte beton elde edilmesini sağlar. Taze beton, zaman içerisinde işlenebilirliğini korumasını ve aynı zamanda erken yüksek mukavemet almasını sağlar. Özellikle hazır betonlarda ihtiyaç duyulan reoloji koruması ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda tavsiye edilir. Kendiliğinden yerleşen betonlar için özellikle tasarlanmıştır.

Çizelge 8.4 Akışkanlaştırıcıların teknik özellikleri ve kullanım alanları (www.chryso.com.tr).

Teknik Özellikleri		Kullanım Alanları
Görünüm	Sarı	Her tür çimento, Kendinden yerleşen beton, Hazır beton, Beyaz veya açık renk beton, Yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonlar için, Plastik veya akıcı beton, Döşeme betonda kullanılmaktadır
Renk	Açık sütlü kahve	
Yoğunluk	1,09 ± 0,01	
pH	6,5 ± 1,5	
Klorür içeriği	< % 0,1	
Katı madde	% 20 ± 1,5	
NaO eşdeğeri	< % 1	

### 8.1.5 Hava Sürükleyici Katkı

Çalışmada hava sürükleyici katkı maddesi olarak, Chryso air legere (Sentetik hava sürükleyici beton katkı maddesi) kullanılmıştır.

Çizelge 8.5 Hava sürükleyici katkının teknik özellikleri ve kullanım alanları (www.chryso.com.tr).

Teknik Özellikleri		Kullanım Alanları
Görünüm	Sıvı	Her tip çimento (Alüminliler hariç), Otoyollar, havaalanı pistleri, Barajlar, göletler, Yol ve deniz inşaatlarında, Bazı kaba kumları, betondaki düşük çimento dozu ile telafi edebilmede, Boşluklu beton.
Renk	Açık kahverengi	
Yoğunluk	1,05	
pH	7,7	
Klorür içeriği	içermez	
Donma Noktası	<-1 °C	

Chryso air legere, sentetik hava sürükleyici bir malzemedir. Bu kimyasal katkının teknik özellikleri ve kullanım alanları Çizelge 8.5’de verilmiştir.

Betonun ve harcın içerisinde kapalı, mikroskopik hava baloncukları oluşturur. Taze betonda, chryso air legere’nin akışkanlaştırıcı etkisiyle, % 15’e kadar su azaltılabilir.

Betonda segregasyonu azaltır. Betondaki terlemeyi durdurur. Üniform yapıdaki kapalı hava kabarcıkları kapilariteyi azaltır ve tamamen kapatır. Bu ürün, yüksek dozajda kullanılması halinde, hafif beton üretiminde kullanılabilir.

## 8.2 Metot

Bu çalışmada; uçucu kül, çimento, kireç, süper akışkanlaştırıcı katkı ve hava sürükleyici katkının çeşitli oranlarda karıştırılması ile farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların oranları Çizelge 8.6’da verilmiştir.

Çizelge 8.6 Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım oranları.

Karışım No	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Çimento (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (Ağırlıkça Bağlayıcı Miktarı (gr) x 0,03)	Hava Sürükleyici Katkı (Ağırlıkça Bağlayıcı Miktarı (gr)x 0,015)
1	75	25	-	-	-
2	75	25	-	3	-
3	75	25	-	3	1,5
4	70	30	-	-	-
5	70	30	-	3	-
6	70	30	-	3	1,5
7	75	-	25	-	-
8	75	-	25	3	-
9	75	-	25	3	1,5
10	70	-	30	-	-
11	70	-	30	3	-
12	70	-	30	3	1,5
13	70	20	10	-	-
14	70	20	10	3	-
15	70	20	10	3	1,5

Karışımların üretimi için öncelikle; uçucu kül, kireç ve çimento hammaddeleri kuru halde homojen bir biçimde karıştırılmış daha sonra bu karışımlara, sert plastik kıvamda (0 slump) karışım elde edilecek biçimde su ilave edilmiştir. Karışımlar homojenliği sağlayıncaya kadar elle karıştırılmıştır.

Karışımlar hazırlanırken, bazı karışımlara süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilmiştir. Karışımlara süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken reçetede bulunan bağlayıcı (kireç ve/veya çimento) miktarının ağırlıkça % 3’ü alınmıştır. Su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0,20’ye göre ayarlanmış ve süper akışkanlaştırıcı katkı, karışım suyuna ilave edilmiştir. Böylece kullanılan karma suyunun azaltılması amaçlanmıştır.

Hava sürükleyici katkının etkisini araştırmak amacı ile süper akışkanlaştırıcı katkı yapılan karışımlara paralel olarak bu reğetelere hava sürükleyici katkının da yapılmasıyla yeni karışımlar hazırlanmıştır. Bu reğetelerin karışımları hazırlanırken; Süper akışkanlaştırıcı katkılı karışımların hazırlanmasında olduğu gibi karışımda bulunan kireç ve/veya imento miktarının ağırlığı oranınca, bağlayıcı miktarının ağırlıkça % 3'ü kadar süper akışkanlaştırıcı katkı ve yine bağlayıcı miktarının % 1,5'u kadar hava sürükleyici katkı ağırlıkça hesaplanıp, su/bağlayıcı oranı 0,20 esas alınıp, belirlenen karışım suyuna eklenerek karıştırılmış daha sonra elde edilen bu sıvı karışım daha önceden hazırlanmış olan homojen kuru karışıma eklenerek karışımlar hazırlanmıştır.

Hazırlanmış olan karışımlar 50 mm x 100 mm boyutundaki silindirik metal kalıp kullanılarak, Şekil 8.2'deki manuel olarak kullanılan hidrolik preste 100 barlık basınç altında Őekillendirilmiřtir.



Şekil 8.2 Hidrolik el presi.

Üretilen numuneler (Şekil 8.3 ve Şekil 8.4) bir gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra yarısı 28 günlük su kürü uygulanmak üzere suya konmuş, numunelerin diğer yarısı ise otoklavda 8 saat süreyle 0,15 Mpa (1,5 Bar) basınç altında buhar kürüne tabi tutularak kür işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.3 Örnek numune.



Şekil 8.4 Örnek numune.

Numuneler hidrolik el presinde metal kalıp yardımıyla üretilmiştir. Üretilen numuneler Şekil 8.5’de görülen Nüve FN 500 marka etüvde kurutulmuştur. Otoklav küründe kullanılan cihaz ise; Şekil 8.6’da gösterilen 0,25 Mpa basınç kapasiteli Mednif marka otoklav kullanılmıştır.



Şekil 8.5 Etüv.



Şekil 8.6 Otoklav.

Numunelerin kür uygulamaları tamamlandıktan sonra su kürü uygulanan karışım örnekleri üzerinde donma-çözünme deneyi uygulanmış, ağırlık kayıpları hesaplanmış ve donma-çözünme testi uygulanan örnek numunelerin başları kesilip düzeltildikten sonra basınç mukavemet değerleri belirlenmiştir.

Donma-çözünme deneyinin uygulandığı derin dondurucu, Şekil 8.7’de, basınç mukavemet testinde kullanılan cihaz ise 20 ton kapasiteli bilgisayar destekli pres olup Şekil 8.8’de gösterilmiştir.



Şekil 8.7 Derin dondurucu.





Şekil 8.8 Pres.

### 8.2.1 Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

28 günlük su kürüne tabi tutulan numunelerin kür işlemi sonuçlandırıldıktan sonra bu numunelerin, su içinde asılı ağırlıkları, yüzeyi kuru halde doygun ağırlıkları ve etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulup kuru tartımları da yapılarak ilgili numunelerin; porozite, bulk yoğunluk ve su emme gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir.

#### 8.2.1.1 Su Emme

Malzemenin birim ağırlık veya hacminin emmiş olduğu su yüzdesi olarak belirtilir. Aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$S_a = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100 \quad (8.1)$$

S<sub>a</sub>: Ağırlık olarak su emme

P<sub>2</sub>: Su emdirilmiş ağırlık, P<sub>1</sub>: Kuru ağırlık

### 8.2.1.2 Porozite

Malzemedeki boşluk oranına porozite adı verilir ve aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$P = \frac{(W_3 - W_1)}{(W_3 - W_2)} \times 100 \quad (8.2)$$

P: Görünür porozite

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Kaynatma ile suya doymun hale getirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Kaynatma ile suya doymun hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr).

### 8.2.1.3 Bulk Yoğunluk

Malzemenin birim hacminin ağırlığı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır.

$$Bd = \frac{W_1}{(W_3 - W_2)} \quad (8.3)$$

Bd: Hacim ağırlığı (Bulk Yoğunluk)

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Kaynatma ile suya doymun hale getirilmiş numunenin su içindeki asılı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Kaynatma ile suya doymun hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr).

#### 8.2.1.4 Birim Hacim Ağırlık

$$D_h = \frac{M_k}{V_h} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (8.4)$$

D<sub>h</sub>: Birim hacim ağırlığı (kg/m<sup>3</sup>),

M<sub>k</sub>: Etüv Kuru Ağırlığı (kg),

V<sub>h</sub>: Numunenin (Delikleri Dahil) hacmi (dm<sup>3</sup>).

#### 8.2.1.5 Görünür Yoğunluk

$$Gr.Y. = \frac{W_1}{(W_1 - W_2)} \quad (8.5)$$

W<sub>1</sub>: Numunenin etüv kuru ağırlığı (gr),

W<sub>2</sub>: Kaynatma ile suya doymuş hale getirilmiş numunenin su içindeki aslı ağırlığı (gr),

W<sub>3</sub>: Kaynatma ile suya doymuş hale getirilmiş numunenin havadaki ağırlığı (gr).

#### 8.2.2 Donma – Çözünme Deneyinin Uygulanması

Yukarıda bahsedilen fiziksel özellikler belirlendikten sonra, su küre uygulan her bir karışım için ayrı ayrı numuneler seçilerek bu numuneler üzerinden; temsili numuneler -28 °C'de derin dondurucuya konularak donma-çözünme deneyi 20 kez tekrarlanmış ve bu numunelerin çevresel etkilere dayanıklılığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Deney yapılırken örnek numuneler 4 saat derin dondurucuda dondurulduktan sonra 2 saat süresince suya konularak çözülmüş ve daha sonra tekrar 4 saat dondurularak döngüler tamamlanmıştır.

### 8.2.3 Basınç Mukavemet Testi

$$fb = \frac{Pk}{A_0} \times k \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (8.6)$$

Fb: Basınç mukavemeti (kgf/cm<sup>2</sup>)

A<sub>0</sub>: Basınç uygulanan yüzün alanı (cm<sup>2</sup>)

Pk: Kırılma anındaki yük (kg)

k: Numunenin biçim katsayısı (k=1)

Numunelerin mekanik özelliklerinden biri olan basınç mukavemet testleri de tüm numunelere uygulanarak numunelerin basınç dayanımları belirlenmiştir.

## 9. BULGULAR

Toplam 15 karışımda hazırlanan örnekler üretilmiş ve örneklerin su kürü ile otoklav kürü uygulanarak; fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Karışımlara ait fiziksel özellikler Çizelge 9.1’de verilmiştir.

Çizelge 9.1 Üretilen karışımların fiziksel özellikleri.

Karışım no	Görünür Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Bulk Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Porozite (%)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )
1	2,17	1,15	47,19	41,15	1146,67
2*	2,05	1,10	46,56	42,43	1097,28
3**	2,10	1,16	44,47	38,19	1164,60
4	2,12	1,13	46,66	41,33	1128,99
5*	1,97	1,16	40,80	35,07	1163,35
6**	2,03	1,14	44,04	38,75	1136,48
7	2,22	1,11	50,24	45,38	1106,97
8*	2,21	1,06	52,15	49,26	1058,76
9**	2,15	1,19	44,77	37,62	1190,14
10	2,20	1,15	47,66	41,36	1152,19
11*	2,25	1,15	46,93	42,21	1154,21
12**	2,21	1,12	49,35	44,17	1117,21
13	2,16	1,17	45,97	39,31	1169,50
14*	2,06	1,16	43,57	37,68	1159,41
15**	2,10	1,20	42,79	35,56	1203,21

\*: Süper akışkanlaştırıcı katkı karışımlar: 2, 5, 8, 11 ve 14. Karışımlar.

\*\* : Süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı bulunan karışımlar: 3, 6, 9, 12 ve 15. Karışımlar.

Karışım örneklerinin fiziksel özellikleri belirlendikten sonra, malzemenin mekanik özelliklerinden biri olan basınç mukavemet testi, bilgisayar destekli 20 ton kapasiteli basınç presinde uygulanmış ve bu testlerin sonunda elde edilen sonuçlar Çizelge 9.2’de verilmiştir.

Çizelge 9.2 Üretilen karışımların basınç mukavemet değerleri.

Karışım	Su Kürü (28 Gün) (kgf/cm <sup>2</sup> )	Otoklav Kürü (8 Saat) (kgf/cm <sup>2</sup> )	Donma- Çözünme Uyg.(kgf/cm <sup>2</sup> )
1	93,46	46,85	94,75
2*	54,97	71,09	56,47
3**	117,21	87,90	147,70
4	111,65	75,35	137,61
5*	66,27	61,15	76,93
6**	103,75	89,38	122,22
7	46,02	41,27	90,99
8*	12,26	15,00	52,74
9**	105,29	66,29	145,89
10	105,71	75,67	147,11
11*	68,54	65,14	118,56
12**	71,93	31,02	139,30
13	125,07	170,67	166,82
14*	93,40	39,09	88,44
15**	140,47	95,90	202,06

\*: Süper akışkanlaştırıcı katkı karışımlar: 2, 5, 8, 11 ve 14. Karışımlar.

\*\* : Süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı bulunan karışımlar: 3, 6, 9, 12 ve 15. Karışımlar.

Basınç mukavemeti sonuçlarını beş ana grupta incelemek mümkündür. Sonuçlar üzerinde yorum yapılırken; benzer reçeteye sahip olan karışımlar ilk etapta dikkate alınacak olup daha sonra yakın olan karışımlarla kıyaslamalar yapılarak sonuçların daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmesine çalışılacaktır.

Karışımlar hazırlanırken ana hammadde olarak % 70-75 oranlarında uçucu kül kullanılmış, kireç ve çimento ise % 25-30 oranlarında karışımlara bağlayıcı olarak eklenmiştir.

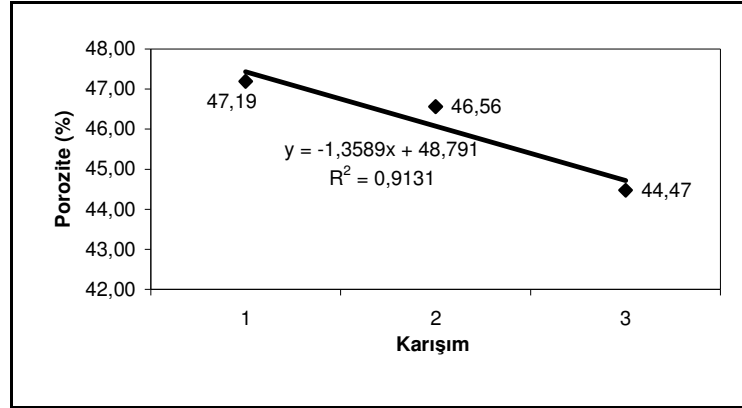
### 9.1 % 25 Kireç bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (1., 2., ve 3. karışımlar).

Bu grupta, % 75 uçucu kül ve % 25 kireç kullanılarak hazırlanan karışımlar yer almaktadır. 1. karışımda kimyasal katkı kullanılmamıştır. 2. karışımda ise sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken; 3. karışımda, süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı karışıma ilave edilerek örnekler üretilmiştir. Bu gruba ait karışımlar Çizelge 9.3’de verilmiştir.

Çizelge 9.3 Karışım oranları (1., 2. ve 3. karışım).

Karışım No	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (Kireç x %3)	Hava Sürükleyici Katkı (Kireç x %1,5)
1	75	25	-	-
2	75	25	0,03	-
3	75	25	0,03	0,015

Şekil 9.1’de uçucu küle bağlayıcı olarak, % 25 oranında katılan kireç ve kimyasal katkıların porozite değerlerine olan etkisi görülmektedir.

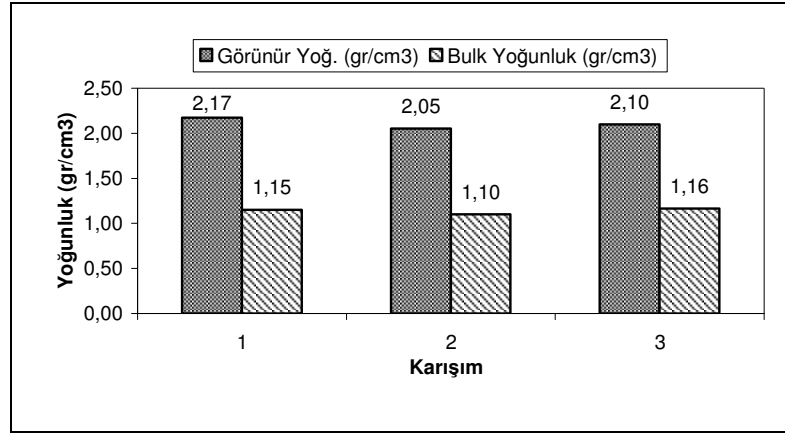


Şekil 9.1 % 25 Kireç bağlayıcılı karışımların porozite değerleri.

Bünyesinde süper akışkanlaştırıcı katkı bulunduran 2. karışım, 1. karışıma oranla daha düşük bir porozite değeri vermiş, hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesiyle 3. karışım bu grup içerisindeki en düşük porozite değerini vermiştir.

Şekil 9.2 incelendiğinde ise; 1. karışımın görünür yoğunluk değeri bu grup içindeki en yüksek değeri verirken; bulk yoğunluk olarak en yüksek değeri 3. karışım sağlamıştır.

1. ve 3. karışımın bulk yoğunluk değerleri birbirine çok yakın olmasına rağmen Şekil 9.1’de de görüldüğü gibi porozite değerlerinde 1. karışımın değeri 3. karışıma oranla daha yüksek olması sebebiyle, bünye içerisindeki malzeme hacmi 3. karışıma oranla daha düşük bir değer aldığından dolayı görünür yoğunluk değerinin daha yüksek bir değer aldığı düşünülmektedir.

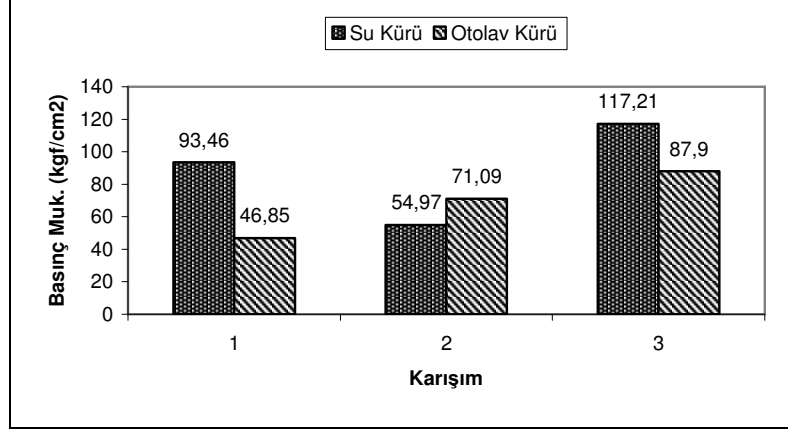


Şekil 9.2 % 25 Kireç bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri.

Örneklerin 28 günlük su kürü ve 8 saatlik otoklav kürü sonundaki basınç mukavemet değerleri Şekil 9.3’de gösterilmiştir.

Şekil 9.3’de ki basınç mukavemet değerlerine bakıldığında su kürü uygulanan örnekler üzerindeki en düşük dayanımı 2. karışımın verdiği görülmektedir ve bu karışımda süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesinin, karışıma eklenen karışım suyunu azalttığı da göz önüne alınırsa bu karışımda yeterli bir reaksiyon gerçekleşmediği ve bu nedenden ötürü basınç dayanımının düşük çıktığı düşünülmektedir.





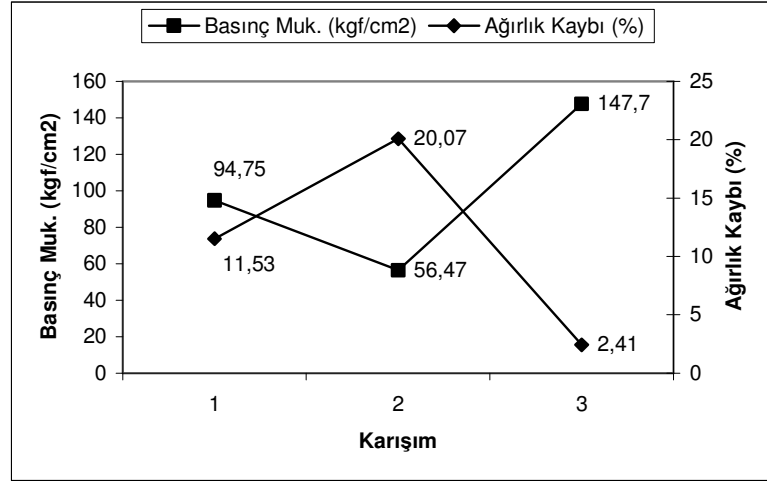
Şekil 9.3 % 25 Kireç bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.

Su kürü uygulanan karışımların basınç mukavemetleri incelendiğinde; Sadece süper akışkanlaştırıcı katkı ilaveli karışımın (2. karışım), 1. karışıma oranla daha düşük bir dayanım gösterdiği fakat süper akışkanlaştırıcı katkı ile hava sürükleyici katkının ilavesiyle grup içerisindeki en yüksek basınç dayanım değerini 3. karışımın verdiği görülmüştür.

Otoklav kürü uygulanan numunelerin basınç dayanım değerleri incelendiğinde ise yine en yüksek dayanımı 3. karışımın verdiği açıkça görülmektedir.

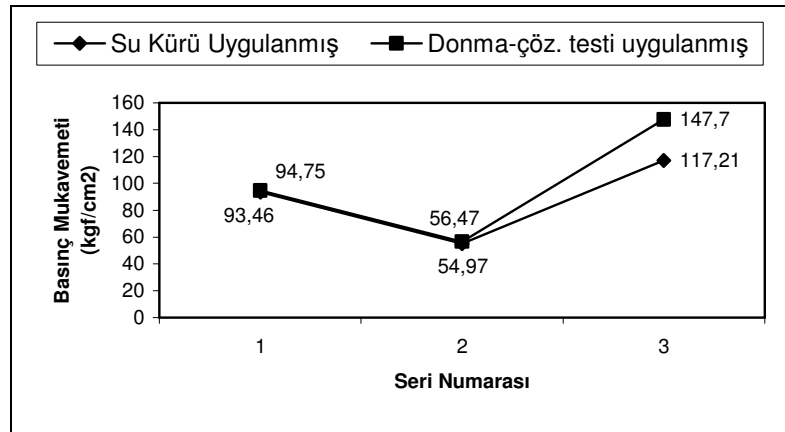
Donma-çözünme deneyinin yapılmasının ardından yapılan gözlemler sonucunda ise; 1., 2. ve 3. karışımlarda yer alan numunelerin deney sonunda belirli bir oranda ağırlık kaybına uğradıkları gözlemlenmiştir.

Hava sürükleyici katkı ve süper akışkanlaştırıcı katkı yapılan 3. karışımın ağırlık kaybı diğer iki karışıma oranla daha düşük çıkmıştır (Şekil 9.4). Bunun yanında sadece süper akışkanlaştırıcı katkı ilaveli, 2. karışımında ise en yüksek ağırlık kaybı değeri elde edilmiştir.



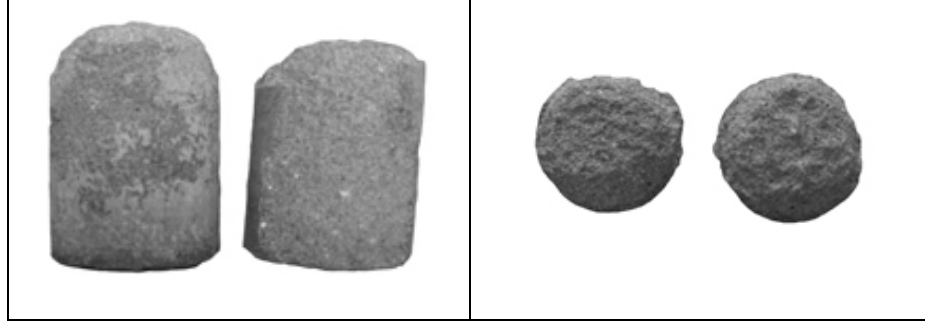
Şekil 9.4 Donma-çözünme testi sonundaki ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.

Şekil 9.5’de görüldüğü üzere donma-çözünme testi sonunda elde edilen basınç dayanımları su kürü uygulanmış olan numunelerin verdiği basınç dayanımı değerlerine benzer bir grafik verirken, donma-çözünme uygulanan numunelerin basınç mukavemet değerleri su kürü uygulanan numunelerden daha yüksek çıkmıştır.

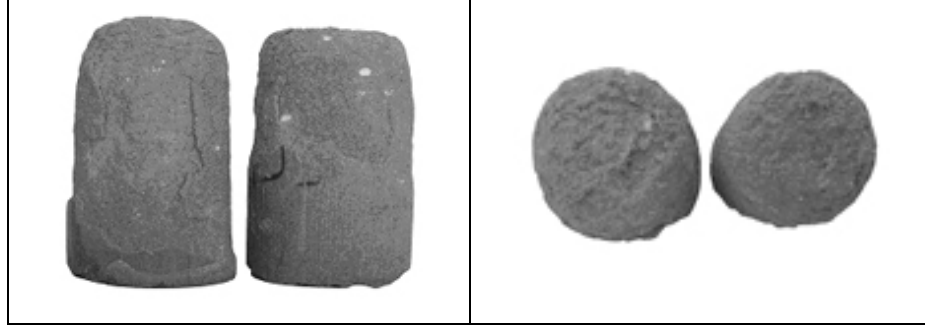


Şekil 9.5 Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.

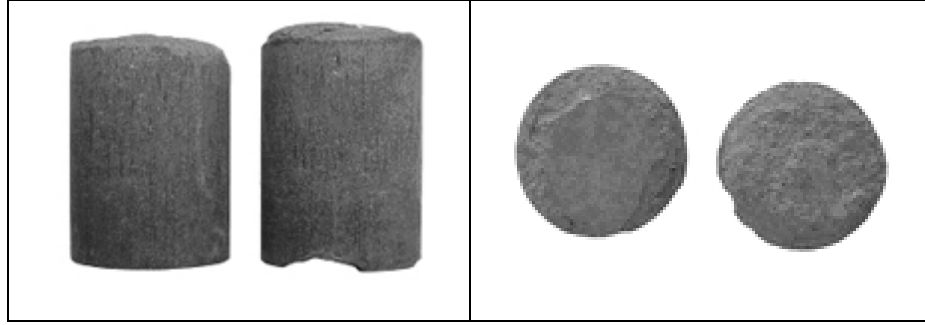
Donma-çözünme deneyi sonunda numunelere ait resimler Şekil 9.6-8’de gösterilmiştir.



Şekil 9.6 1. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.7 2. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.8 3. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.

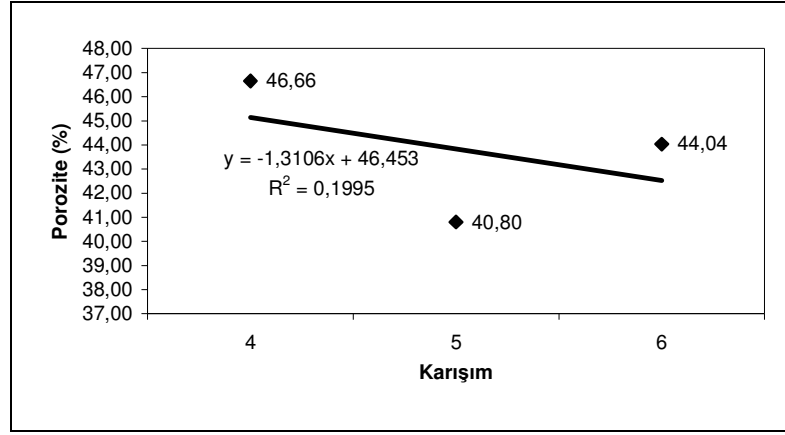
### **9.2 % 30 Kireç bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (4., 5. ve 6. karışımlar).**

Bu grupta, %70 uçucu kül ve % 30 kireç kullanılarak hazırlanan karışımlar yer almaktadır. 4. karışımında kimyasal katkı kullanılmamıştır. 5. karışımında ise sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken, 6. karışımında süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı karışıma ilave edilerek örneklerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gruba ait karışımlar Çizelge 9.4'de verilmiştir.

Çizelge 9.4 Karışım oranları (4., 5. ve 6. karışım).

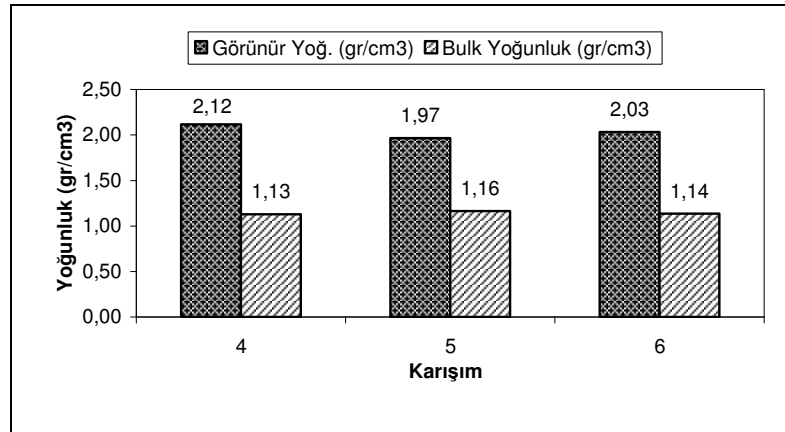
Karışım No	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (Kireç x %3)	Hava Sürükleyici Katkı (Kireç x %1,5)
4	70	30	-	-
5	70	30	0,03	-
6	70	30	0,03	0,015

Şekil 9.9'da; uçucu küle bağlayıcı olarak, % 30 oranında katılan kireç ve kimyasal katkılardan hazırlanan numunelerin porozite değerleri görülmektedir.



Şekil 9.9 % 30 Kireç bağlayıcılı karışımların porozite değerleri.

Şekilde de görüldüğü gibi akışkanlaştırıcı katkı yapılan 5. karışımın porozite değeri en düşük değeri sağlarken, 4. karışım en yüksek porozite değerini vermiştir.

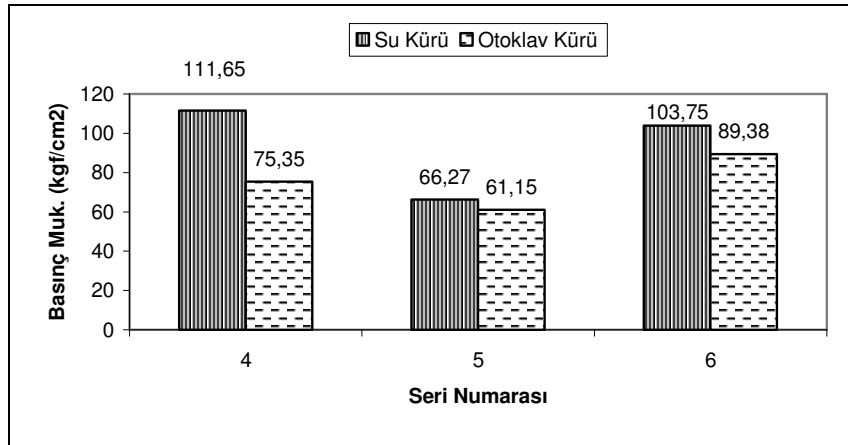


Şekil 9.10 % 30 Kireç bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri.

Porozite oranı en düşük olan 5. karışım, Şekil 9.10'da da görüldüğü üzere görünür yoğunluk değeri bakımından grup içinde en düşük değeri verirken bulk yoğunluk değeri bakımından da en yüksek değeri sağlamıştır.

Basınç dayanımları incelendiğinde ise, 4. karışım örnekleri su kürü sonunda en yüksek dayanımı sağlarken otoklav kürü uygulanan numuneler içinde de en iyi dayanımı süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkının birlikte eklendiği 6. karışım örnekleri vermiştir.

Genel açıdan bakıldığında, 5. karışımında süper akışkanlaştırıcı katkı yapılmasıyla basınç dayanımı değerlerinde düşüş gerçekleşirken, hem süper akışkanlaştırıcı katkı ve hem de hava sürükleyici katkının beraber yapıldığı 6. karışımın dayanım değerleri ise; sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılan 5. karışıma göre daha iyi çıkmıştır (Şekil 9.11).

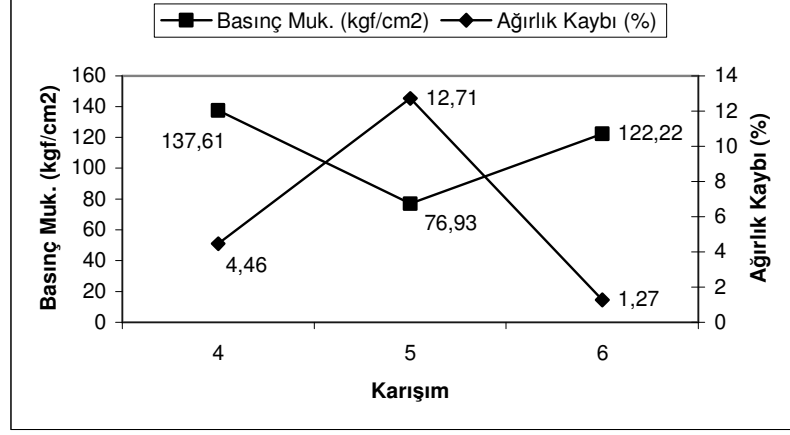


Şekil 9.11 % 30 Kireç bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.

Otoklav kürüne tabi tutulan örneklerin basınç dayanım sonuçlarına göre ise en yüksek dayanım 6. karışım örneklerinde elde edilirken ( $89,38 \text{ kgf/cm}^2$ ), en düşük dayanım değeri ise 5. karışım örneklerinde elde edilmiştir ( $61,15 \text{ kgf/cm}^2$ ).

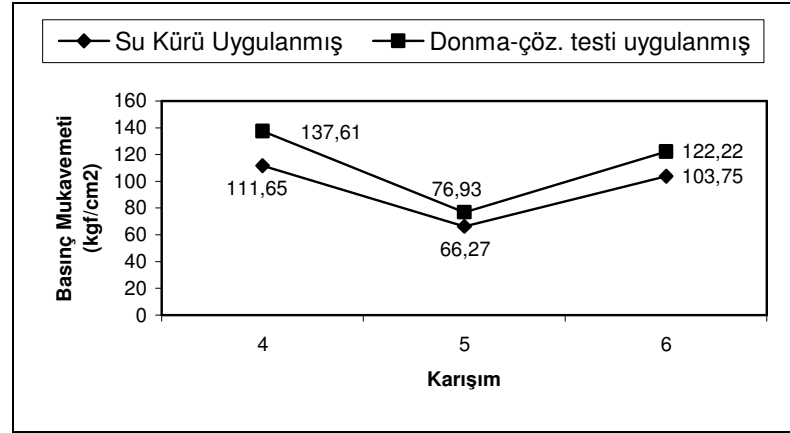
Donma-çözünme testine tabi tutulan numunelerin ağırlık kaybı ve basınç dayanımı test sonuçları Şekil 9.12'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre donma-çözünme testine giren numunelerin basınç dayanım değerleri, su kürü uygulanmış

numunelerden daha yüksek bir basınç dayanım değerleri vermiş ve en yüksek basınç dayanımı 4. karışım örneklerinde elde edilmiştir.



Şekil 9.12 Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.

Şekil 9.12'deki ağırlık kayıpları incelendiğinde, hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkı bulunduran 6. karışım örnekleri donma-çözünme deneyine daha fazla dayanıklılık göstermiş ve az bir oranda ağırlık kaybına uğramıştır.

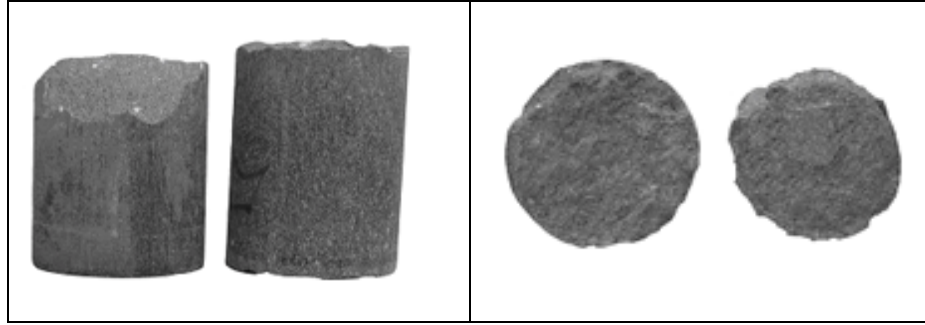


Şekil 9.13 Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.

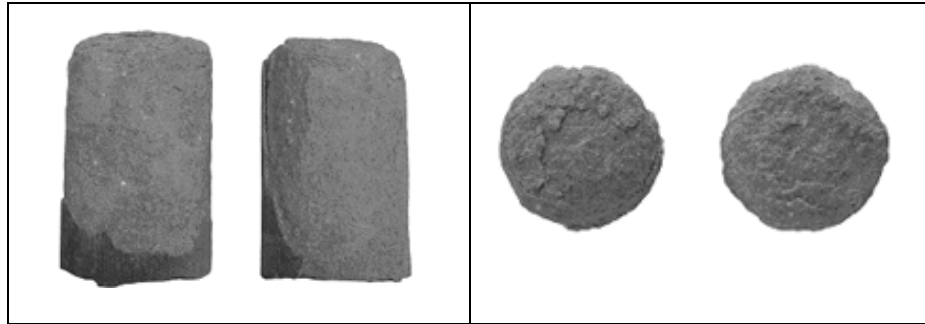
Şekil 9.13'de donma-çözünme testine tabi tutulan örneklerin basınç mukavemet değerleri ile yine aynı karışıma ait örneklerin su kürü sonundaki basınç mukavemet değerlerinin kıyaslaması gösterilmiştir. Bu grafiğe göre bu grupta yer

alan karışımların tümünün donma-çözünme deneyi sonunda dayanım kazandığı açıkça görülmektedir.

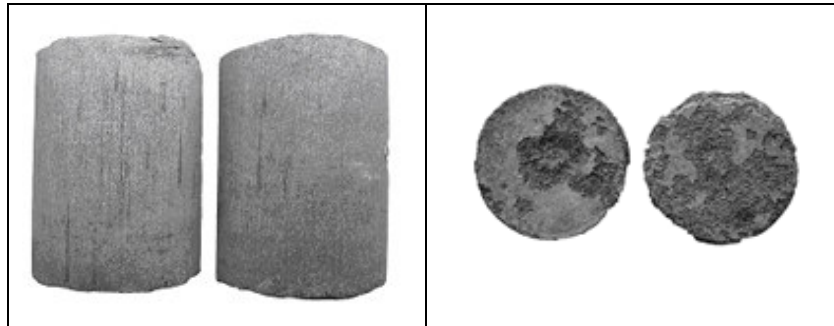
Donma-çözünme deneyi yapılmış numunelerin resimleri Şekil 9.14-16'da gösterilmiştir.



Şekil 9.14 4. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.15 5. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.16 6. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.

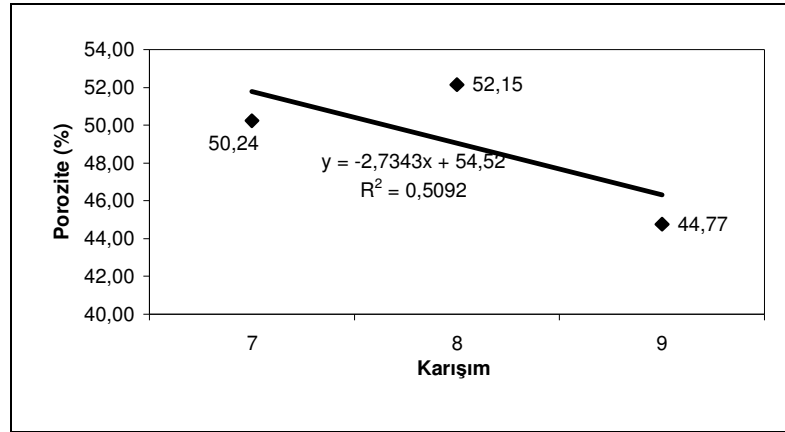
### 9.3 % 25 Çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (7., 8. ve 9. karışımlar).

Bu grupta, %75 uçucu kül ve % 25 çimento kullanılarak hazırlanan karışımlar yer almaktadır. 7. karışımda kimyasal katkı kullanılmamıştır. 8. karışımda ise sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken, 9. karışımda süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı hazırlanan karışıma katılarak örnek numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gruba ait karışımlar Çizelge 9.5’de verilmiştir.

Çizelge 9.5 Karışım oranları (7., 8. ve 9. karışım).

Karışım No	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (Çimento x %3)	Hava Sürükleyici Katkı (Çimento x %1,5)
7	75	25	-	-
8	75	25	0,03	-
9	75	25	0,03	0,015

Şekil 9.17’de % 25 çimento bağlayıcılı karışımların porozite değerleri görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi en yüksek porozite değeri 8. karışımda elde edilmiş en düşük porozite değeri ise 9. karışımda elde edilmiştir.

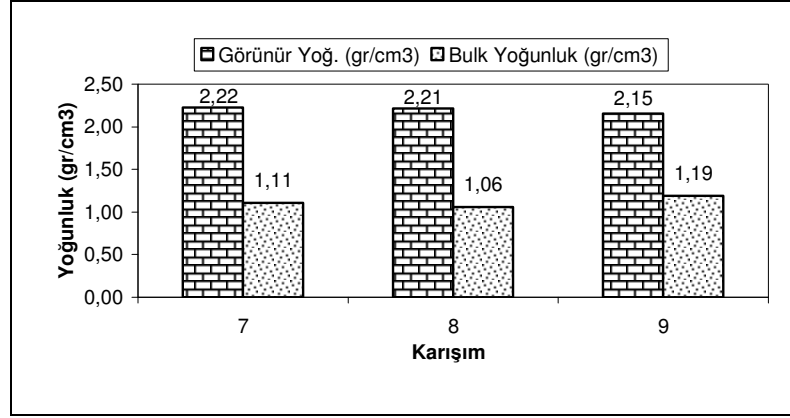


Şekil 9.17 % 25 Çimento bağlayıcılı karışımların porozite değerleri.

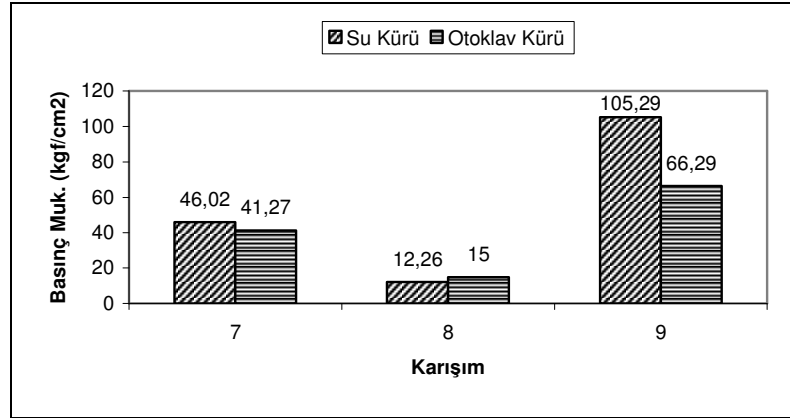
Basınç mukavemet grafiği (Şekil 9.19) ve yoğunluk grafiklerine (Şekil 9.18) bakıldığında 8. karışımın yeterli reaksiyonu gösteremediği ve bu sebeple porozite değerlerinin yüksek, bulk yoğunluk değerinin de düşük olduğu düşünülmektedir.



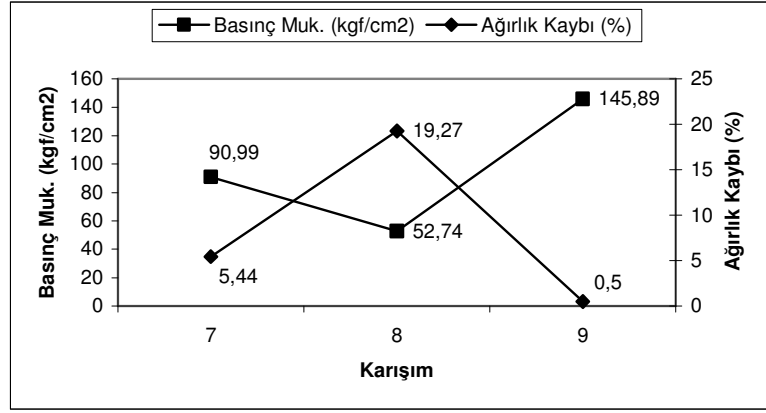
Basınç mukavemeti açısından da 8. karışım en düşük dayanım değerlerini sağlarken bu grup içerisindeki en yüksek değeri 9. karışım sağlamıştır. 8. karışımın ise yeterli reaksiyonu gösteremediği ve bu sebeple dayanım değerlerinde ciddi bir düşüş olduğu düşünülmektedir (Şekil 9.19).



Şekil 9.18 % 25 Çimento bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri.

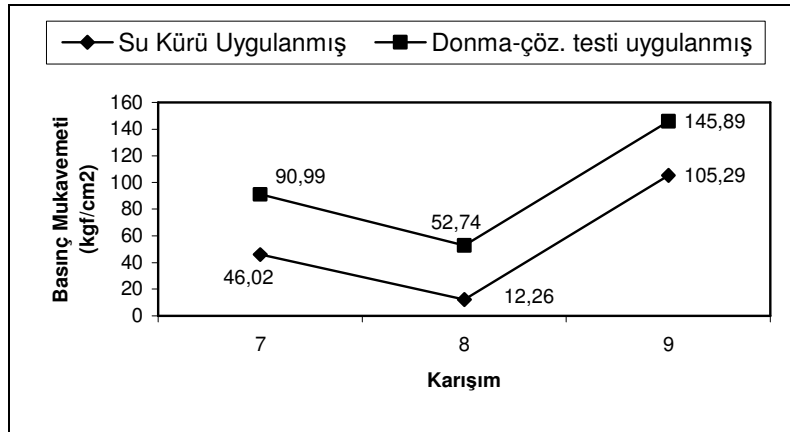


Şekil 9.19 % 25 Çimento bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.



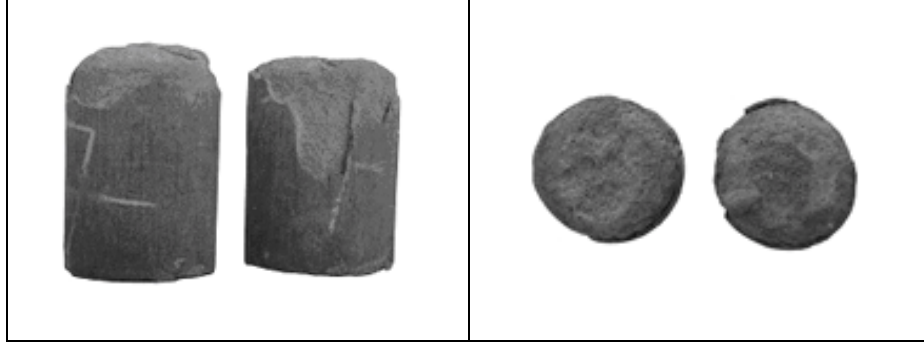
Şekil 9.20. Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.

Şekil 9.20 ve Şekil 9.21 incelendiğinde, bu gruptaki karışımlarda da diğer gruplarda olduğu gibi donma-çözünme testi sonunda basınç dayanımlarında, aynı karışıma ait örneklerin su kürü uygulanmış numuneleri ile kıyaslandığında basınç dayanım değerlerinde belli bir artış gözlemlenmiştir.

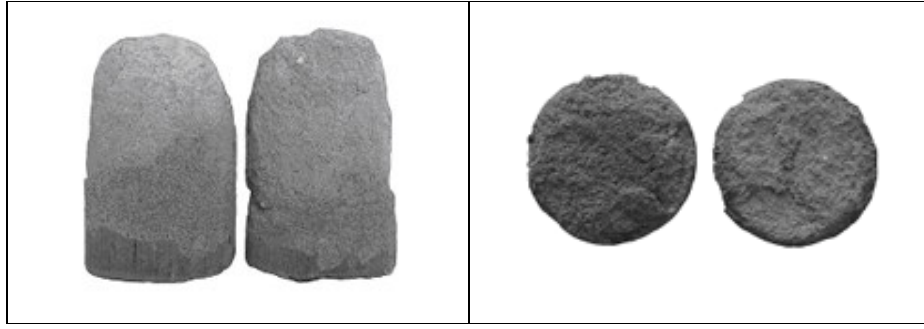


Şekil 9.21 Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.

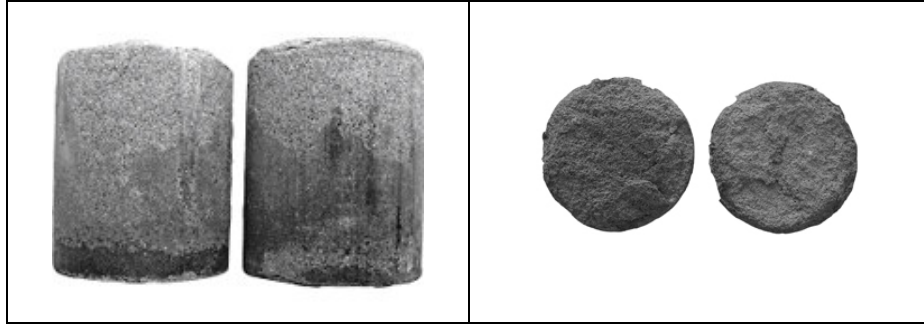
Donma-çözünme deneyi yapılmış numunelerin resimleri Şekil 9.22-24'de gösterilmiştir.



Şekil 9.22 7. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.23 8. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.24 9. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.

#### **9.4 % 30 Çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (10., 11. ve 12. karışımlar).**

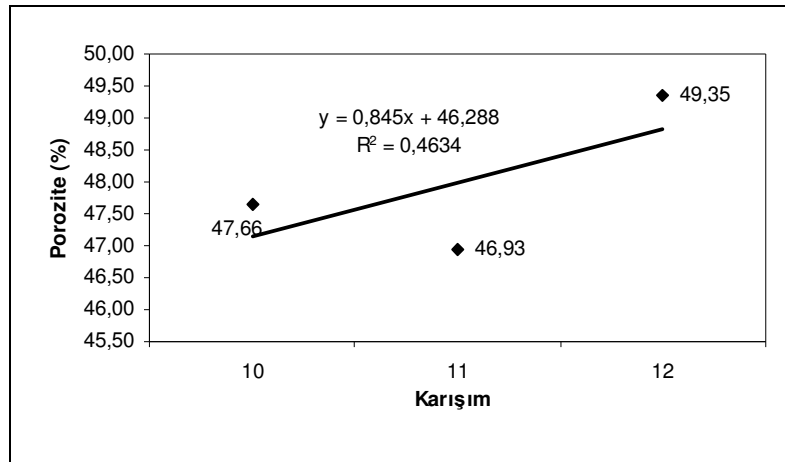
Bu grupta, % 70 uçucu kül ve % 30 çimento kullanılarak hazırlanan karışımlar yer almaktadır. 10. karışımında kimyasal katkı kullanılmamıştır. 11. karışımında ise sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken, 12. karışımında süper akışkanlaştırıcı

ve hava sürükleyici katkı oluşturulan karışıma ilave edilmek suretiyle örnek numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gruba ait karışımlar Çizelge 9.6'da verilmiştir.

Çizelge 9.6 Karışım oranları (10., 11. ve 12. karışım).

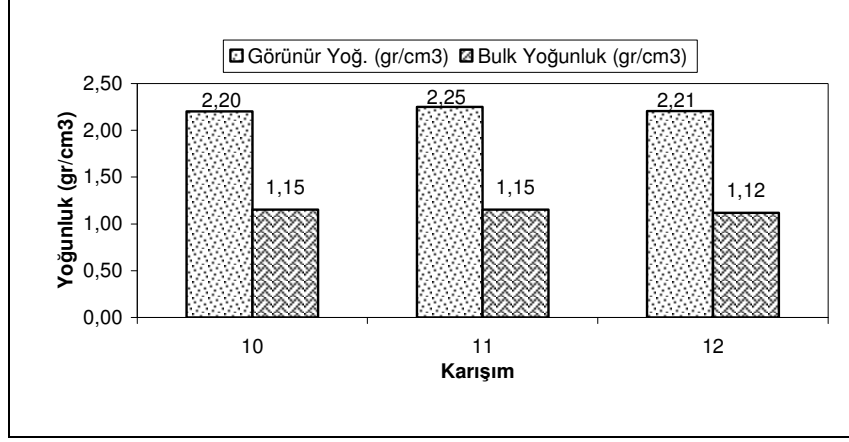
Karışım No	Uçucu Kül (%)	Çimento (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı (Çimento x %3)	Hava Sürükleyici Katkı (Çimento x %1,5)
10	70	30	-	-
11	70	30	0,03	-
12	70	30	0,03	0,015

Şekil 9.25'de en yüksek porozite değerini 12. karışım sağlarken, en düşük değeri sadece süper akışkanlaştırıcı katkı bulunduran, 11. karışım sağlamıştır.



Şekil 9.25 % 30 Çimento bağlayıcılı karışımların porozite değerleri.

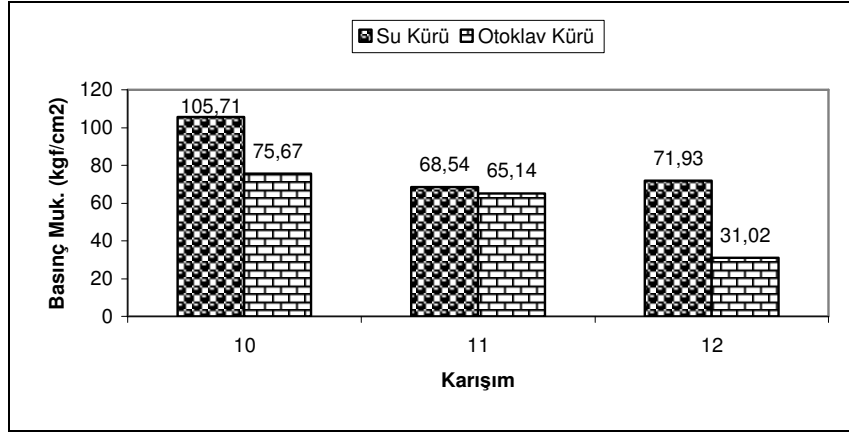
Bu grup içerisinde 10. ve 11. karışımlar bulk yoğunluk değerleri birbirleriyle aynı çıkarken görünür yoğunluk açısından en yüksek değeri 11. karışım sağlamıştır (Şekil 9.26).



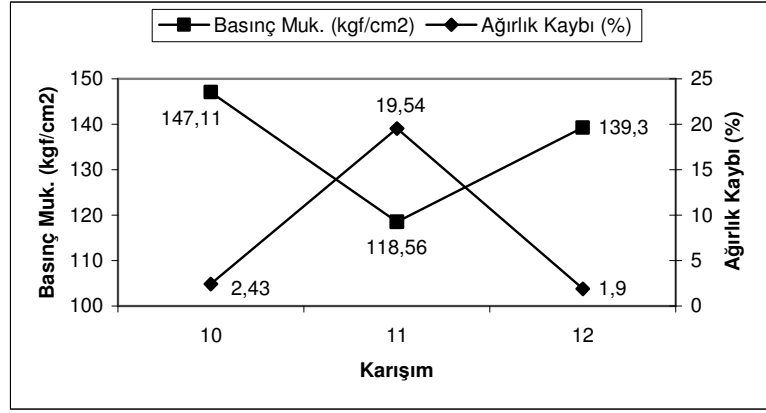
Şekil 9.26 % 30 Çimento bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri.

Su kürü uygulanan numunelerden en iyi dayanımı 10. karışım örnekleri sağlarken en düşük dayanımı süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılan 11. karışım örnekleri vermiştir.

Şekil 9.27'de de görüldüğü gibi otoklav kürüne tabi tutulan numunelerden ise yine en iyi dayanımı 10. karışım sağlarken en düşük dayanımı hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkının yapıldığı 12. karışım sağlamıştır.

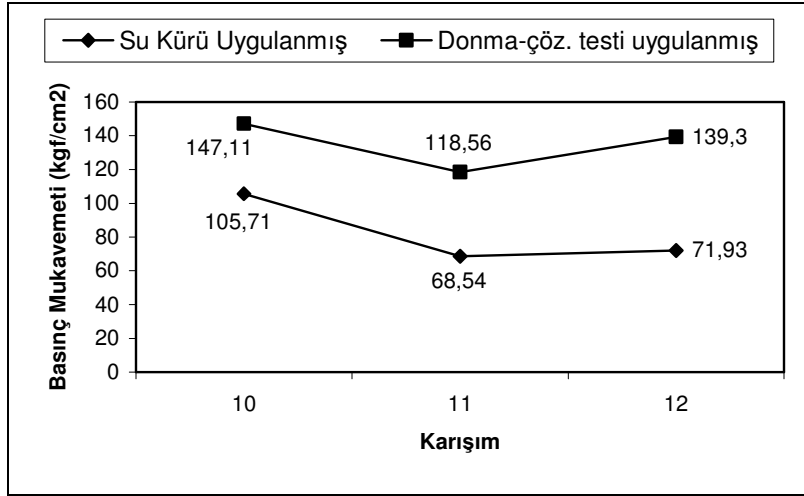


Şekil 9.27 % 30 Çimento bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.



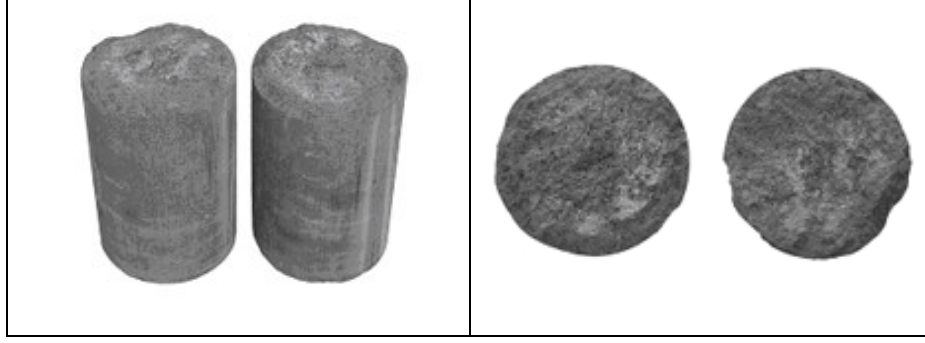
Şekil 9.28 Donma-çözünme testi uygulanmış numunelerin ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.

Şekil 9.28 ve Şekil 9.29'da ki değerler incelendiğinde ise ağırlık kaybı olarak hava sürükleyici katkının yapıldığı 12. karışım örneklerinin en az ağırlık kaybını gerçekleştirdiği ve en iyi dayanımı ise 10. karışım örneklerinin verdiği gözlemlenmiştir.

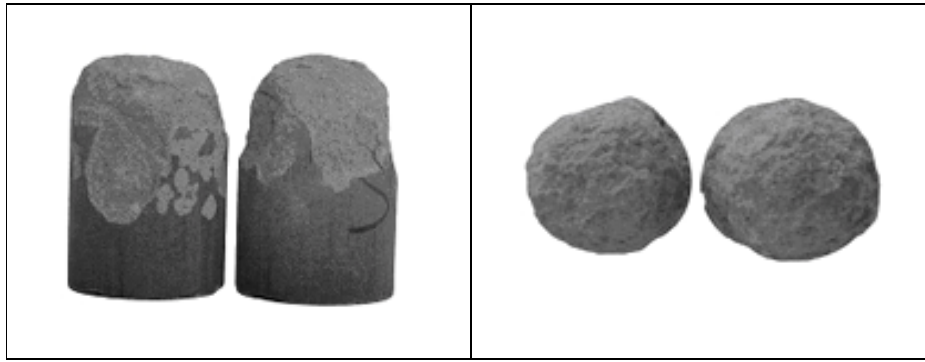


Şekil 9.29 Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.

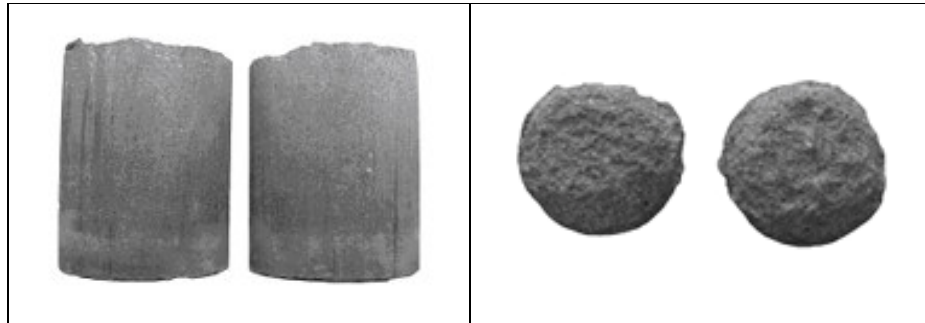
Donma-çözünme deneyi yapılmış numunelerin resimleri Şekil 9.30-32'de gösterilmiştir.



Şekil 9.30 10. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.31 11. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.32 12. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.

**9.5 % 20 Kireç ve % 10 çimento bağlayıcılı karışımlara ait bulgular (13., 14. ve 15. karışımlar).**

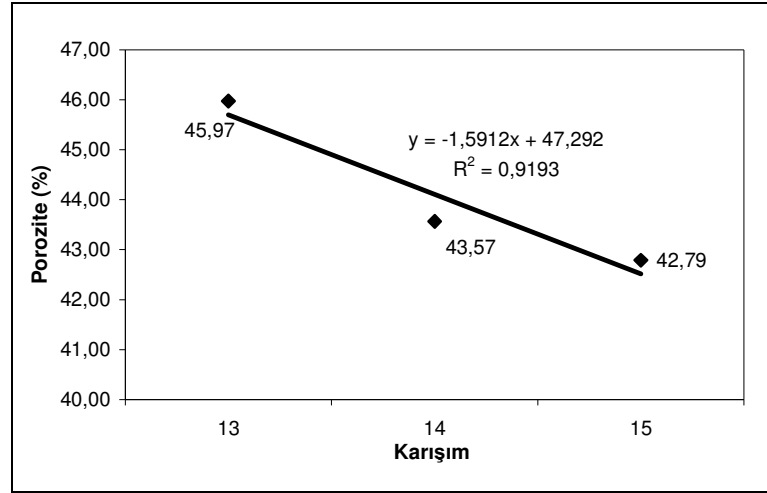
Bu grupta, % 70 uçucu kül ve % 20 kireç ve % 10 çimento kullanılarak hazırlanan karışımlar yer almaktadır. 13. karışımda kimyasal katkı kullanılmamıştır. 14.

karışımında ise sadece süper akışkanlaştırıcı katkı yapılırken, 15. karışımında süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı hazırlanan karışıma eklenerek örneklerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gruba ait karışımlar Çizelge 9.7’de verilmiştir.

Çizelge 9.7 Karışım oranları (13., 14. ve 15. Karışım).

Karışım No	Uçucu Kül (%)	Kireç (%)	Çimento (%)	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı ((Kireç+Çimento)x%3)	Hava Sürükleyici Katkı ((Kireç+Çimento)x%1,5)
13	70	20	10	-	-
14	70	20	10	0,03	-
15	70	20	10	0,03	0,015

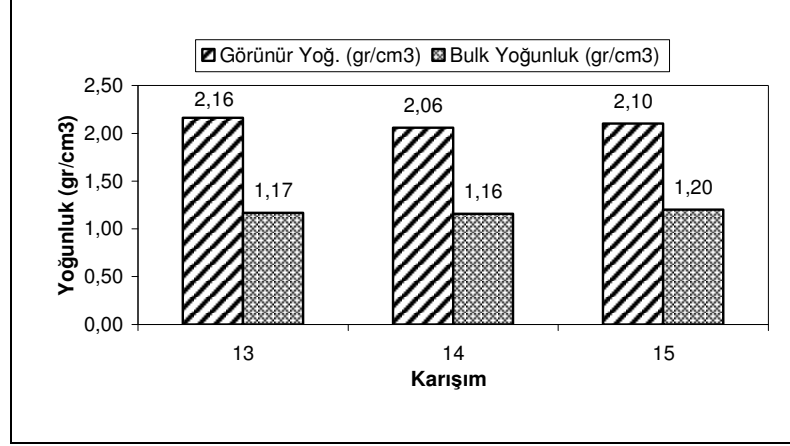
Bu grupta yer alan karışımların sonuçları incelendiğinde, porozite değerleri bakımından (Şekil 9.33) en yüksek değeri kimyasal katkı içermeyen 13. karışımın verdiği görülmüştür.



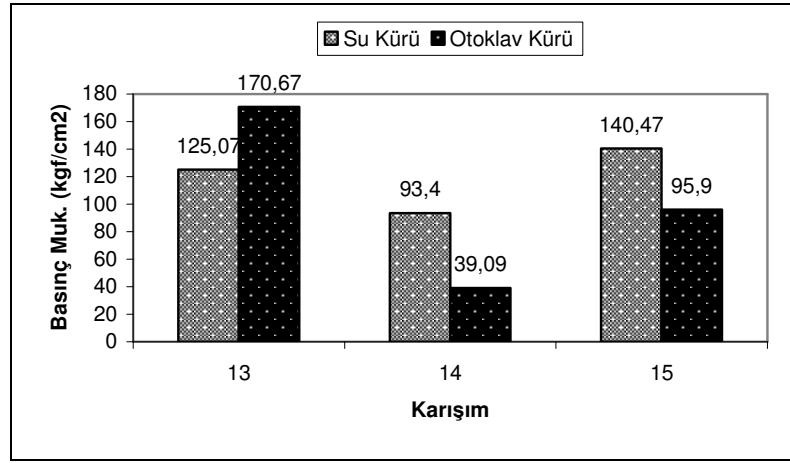
Şekil 9.33 % 20 Kireç ve %10 çimento bağlayıcılı karışımların porozite değerleri.

Bulk yoğunluk değeri açısından ise en düşük değeri 14. karışımın verdiği (Şekil 9.34) görünür yoğunluk değeri açısından ise 13. karışımın en yüksek değeri verdiği saptanmıştır.





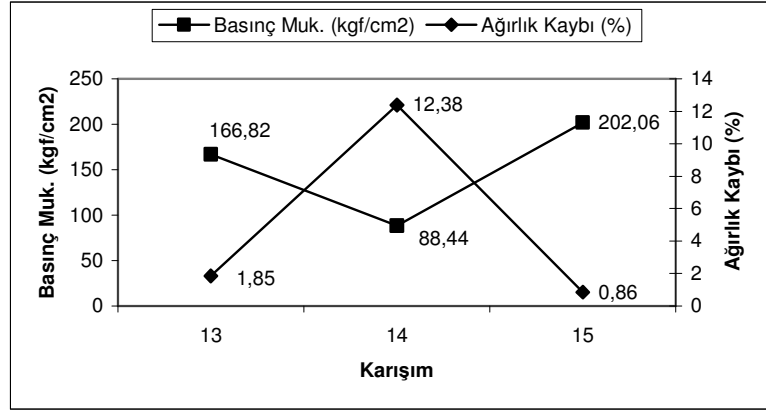
Şekil 9.34 % 20 Kireç ve % 10 çimento bağlayıcılı karışımların yoğunluk değerleri.



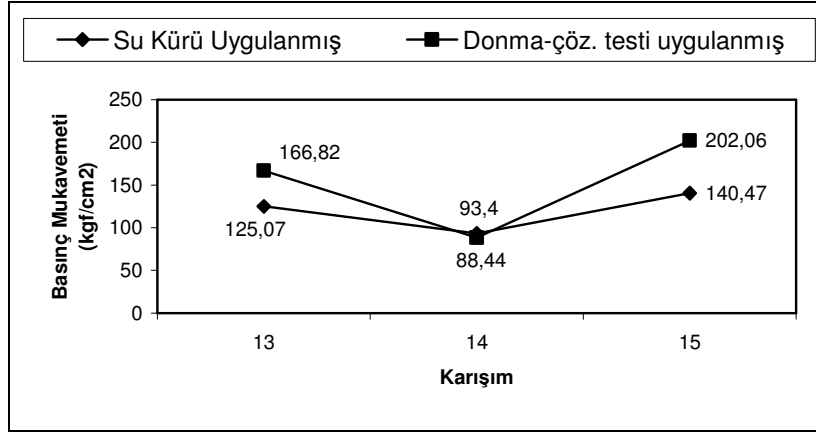
Şekil 9.35 % 20 Kireç ve % 10 çimento bağlayıcılı karışımların basınç mukavemet değerleri.

Şekil 9.35’de basınç mukavemet değerleri incelendiğinde, en iyi dayanım değeri 13. karışımın otoklavda kür edilmiş olan numunelerinden alındığı en düşük dayanım değerini ise 14. karışımın verdiği görülmüştür.

Şekil 9.36 ve Şekil 9.37 incelendiğinde ise hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkıların beraber kullanıldığı 15. karışımın donma-çözünme testi sonunda en az ağırlık kaybına uğradığı ve en iyi dayanımı da 15. karışım örneklerinin verdiği görülmektedir.

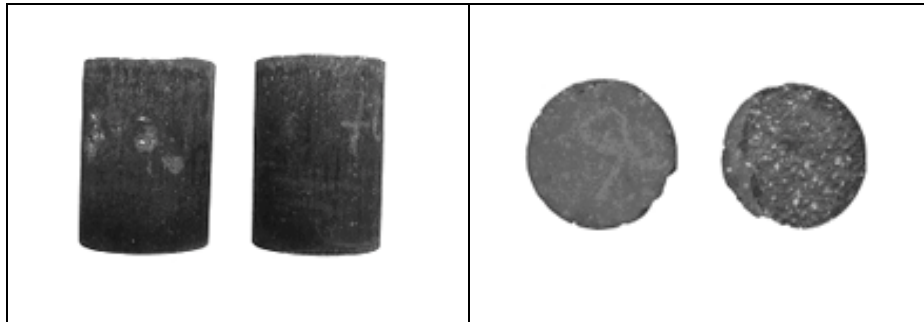


Şekil 9.36 % 20 Kireç ve % 10 çimento bağlayıcılı karışımların donma-çözünme testi sonundaki ağırlık kaybı ve basınç mukavemet değerleri.

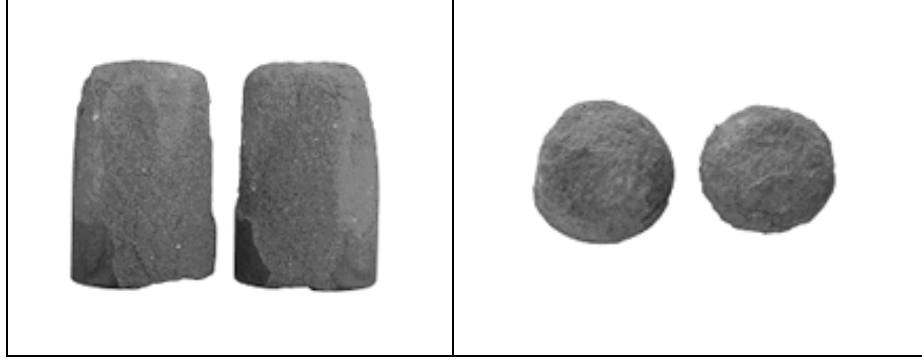


Şekil 9.37 Donma-çözünme deneyi sonundaki basınç mukavemet değerleri.

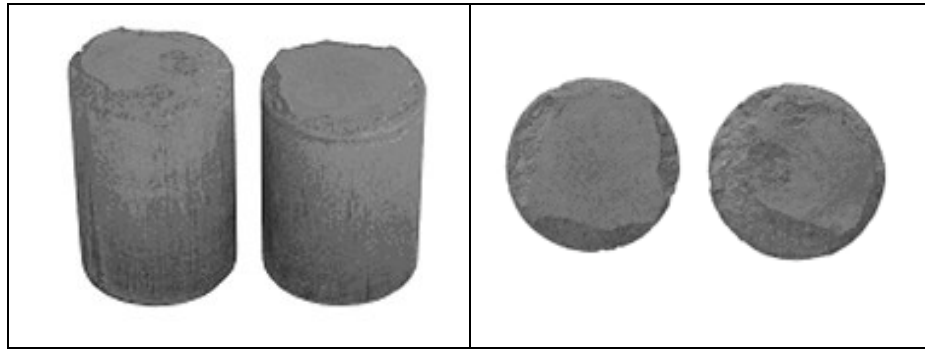
Donma-çözünme deneyi yapılmış numunelerin resimleri Şekil 9.38-40'da gösterilmiştir.



Şekil 9.38 13. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.39 14. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.



Şekil 9.40 15. Karışım örneklerinin donma-çözünme deneyi sonundaki resimleri.

## 10. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şunlardır;

- Uçucu küle, % 25 oranında katılan kireç (1., 2. ve 3. karışımlar) ve çimento (7., 8. ve 9. karışımlar) bağlayıcı ile üretilen karışımlar birbirleriyle kıyaslandığında; çimento bağlayıcılı karışımların kireç bağlayıcılı karışımlara oranla daha yüksek bir porozite ve su emme değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Çimentolu karışımlarda kireçli karışımlara oranla daha az bir reaksiyon gerçekleştiği ve bu sebepten ötürü porozite ve su emme değerlerinin yüksek çıktığı düşünülmektedir.
- % 25 oranında çimento ve kireç bağlayıcılı örneklerde, süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı birlikte katıldığında ise; bünye içerisindeki en iyi reaksiyonu gerçekleştirdiği, porozite ve su emme değerlerinin en düşük değerleri verdiği belirlenmiştir.
- % 30 bağlayıcı katılan örneklerde (4., 5. ve 6. karışım) ve (10., 11. ve 12. karışım); % 25 oranında bağlayıcı katılı örneklere göre, porozite ve su emme değerlerinde göre düşüş gerçekleşmiştir. Bunun bağlayıcı miktarındaki artış ile birlikte hidrasyon sürecinde daha çok (C-H-S) yapısı geliştiğinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- % 25 bağlayıcı katılan örneklerde, süper akışkanlaştırıcı katkı birim hacim ağırlıklarında azalma gerçekleştirirken, hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesinin beraber yapıldığı karışımlarda birim hacim ağırlıkları artmıştır ve kendi grupları içindeki en yüksek değerleri almıştır.
- % 30 bağlayıcı katılan örneklerde, süper akışkanlaştırıcı katkı yapıldığında, birim hacim ağırlıklar artmış fakat hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkının birlikte eklendiği karışımlarda birim hacim

ağırlıklar azalmıştır. Buna, hava sürükleyici katkının bünyede kapalı gözenek oluşturmasının neden olduğu düşünülmektedir.

- % 20 kireç ve % 10 çimento bağlayıcılı karışımlar içerisinde ise; en yüksek birim hacim ağırlık değerini süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkının birlikte yapıldığı örnekler sağlarken (15. karışım), tüm karışımlar içerisindeki en yüksek değeri ( $1203,21 \text{ kg/m}^3$ ) bu karışım örnekleri sağlamıştır.
- Su kürü uygulanan numunelerin basınç dayanım değerlerinde ise; % 25 bağlayıcı katılan örneklerde, karışımlara süper akışkanlaştırıcı ilavesi yapıldığında içerisinde katkı bulunmayan karışımlara oranla dayanımlarda düşüş gerçekleşmiş ve hava sürükleyici katkı ile süper akışkanlaştırıcı katkının ilave edildiği karışımlarda ise grup içerisindeki en iyi basınç dayanımları elde edilmiştir.
- % 30 bağlayıcı katılan karışımların basınç dayanım değerlerinde ise % 25 bağlayıcı katılı örneklerde olduğu gibi süper akışkanlaştırıcı katılı karışımların dayanımı, kimyasal katkı bulunmayan karışım örneklerinin değerlerine oranla düşmüş fakat hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkının beraber eklendiği örneklerin dayanımları kimyasal katkı bulunmayan örneklere oranla daha düşük çıkmıştır.
- Örneklerin karışımındaki bağlayıcı oranı arttıkça, karışımlara eklenen akışkanlaştırıcı katkının basınç dayanım değerlerini düşürdüğü saptanmıştır.
- % 20 kireç ve % 10 çimento bağlayıcısı bulunduran örneklerin basınç dayanım değerleride, % 25 bağlayıcı bulunduran örneklerin basınç dayanım değerleriyle benzer bir ilişki vermiş ve en yüksek basınç mukavemet değeri 15. karışım örneklerinde ( $140,47 \text{ kgf/cm}^2$ ) elde edilmiştir.

- Otoklav kürü uygulanan örneklerin basınç mukavemet değerlerinde en iyi dayanım değeri 13. karışım örneklerinde ( $170,67 \text{ kgf/cm}^2$ ) elde edilmiştir. 8. karışım örnekleri ( $15,00 \text{ kgf/cm}^2$ ) ise, en düşük basınç dayanım değerini vermiştir.
- Donma-çözünme testi sonunda, 9. karışım örnekleri, % 0,5'lik bir ağırlık kaybına uğrarken, en yüksek ağırlık kaybı 2. karışım örneklerinde (% 20,07) gerçekleşmiştir.
- Donma-çözünme testine giren karışımlarda; çimento bağlayıcılı örneklerin, kireç bağlayıcılı örneklere göre daha az bir ağırlık kaybı ve daha yüksek basınç dayanım değerleri verdiği saptanmıştır.
- Donma çözünme testine giren örneklerde, 28 gün su kürü uygulanan numuneler ve 1,5 bar basınç altında 8 saat süre ile otoklav kürü uygulanan örneklere göre daha yüksek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Donma çözünme testine giren örnekler fiziksel olarak hasar gördükleri halde basınç dayanımı değerleri gelişmiştir. Buna uçucu küllü örneklerin 28 günlük su kürü uygulaması sonunda sulu ortamda (donma çözünme testleri sürecinde) hidrasyon sürecinin devam ettiği ve dolayısı ile mikro yapıda yeni hidrasyon ürünlerin oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Üretilen numunelerin, gazbeton örnekler ile karşılaştırılmasını yapmak için TS 453'te (TS, 1998) belirtilen gazbeton malzemelerin, TS 704 (TS, 1979) ve TS 705'de (TS, 1985) belirtilen yapı tuğlaları ile TS 500'de (TS, 2000) belirtilen normal betonların birim ağırlıkları ve ısı iletkenlik katsayıları Çizelge 10.1'de verilmiştir.

Buna göre gaz beton örneklerin birim ağırlıklarına göre basınç dayanımları  $15-75 \text{ kg/cm}^2$  arasında değişmektedir (TS 453, 1998).

Normal betonun birim ağırlığı  $2,2 \text{ gr/cm}^3$  (TS, 2000) ve  $(\lambda)$  katsayısı  $1,74 \text{ W/mK}$ 'dir. (Çizelge 10.1)

Çizelge 10.1 Bazı malzemelerin ısı iletkenliği değerleri  $(\lambda)$ , (TS, 1998).

Malzeme veya Bileşenin Çeşidi	Birim Hacim Ağırlığı ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl iletkenlik hesap değeri $(\lambda) \text{ W/mK}$
Buharla Sertleştirilmiş Gaz Betonlar (TS 453'e uygun yapı elemanları dahil)	400	0,14
	500	0,16
	600	0,19
	700	0,21
	800	0,23
TS 704 ve TS 705'e Uygun Yapı Tuğlaları	1200	0,50
	1400	0,58
	1600	0,68
	1800	0,81
	2000	0,96
TS 500'e Uygun Normal Betonlar (Donatısız)	2200	1,74

Sonuç olarak; hafif beton ve blokların birim ağırlıkları  $700\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$  arasında değişmektedir. Taşıyıcı hafif betonlarda havada kurumuş haldeki ağırlığının  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'den az, silindir basınç dayanımının  $17 \text{ N/mm}^2$  ( $170 \text{ kgf/cm}^2$ )'den az olmaması istenir.

Yalıtım bloklarının birim hacim ağırlıkları,  $800\text{-}1800 \text{ kg/m}^3$  ve dayanımları  $0,7\text{-}7 \text{ N/mm}^2$  ( $7\text{-}70 \text{ kgf/cm}^2$ ) değerleri arasındadır. Bims bloklarda ise basınç dayanım değeri, minimum  $2 \text{ N/mm}^2$  ( $20 \text{ kgf/cm}^2$ ), ortalama  $2,5 \text{ N/mm}^2$  ( $25 \text{ kgf/cm}^2$ ) olmalıdır (Serin 1999).

Bununla birlikte üretilen numuneler; TS 453 (TS, 1998)'de tanımlanan gaz betonun basınç dayanım değerlerini de ( $15\text{-}75 \text{ kgf/cm}^2$ ) sağlamış ve TS 500 (TS, 2000)'de bahsedilen normal betonların birim hacim ağırlığından daha düşük birim hacim ağırlıklar elde edilmiştir.

## 11. SONUÇ

Üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerleri; 1058,76 – 1203,21 kg/m<sup>3</sup> arasında olduğu tespit edilmiş ve hafif blokların birim ağırlık değerlerini verdiği saptanmıştır.

Basınç mukavemet değerleri açısından incelendiğinde ise üretilen karışımlardan elde edilen basınç mukavemet değerleri; su kürü uygulanan karışımlarda; 12,26 – 140,47 kgf/cm<sup>2</sup>, otoklavda kür edilen karışımlarında ise; 15,00 - 170,67 kgf/cm<sup>2</sup> değerleri elde edilmiş ve bu değerler bims blokların minimum ve ortalama düzeydeki basınç dayanımları değerlerinden yüksek olduğu (sadece 8. karışım örnekleri istenen basınç dayanımı değerlerini verememiştir) ve aynı zamanda yalıtım blokları açısından istenen 7-70 kgf/cm<sup>2</sup>'lik basınç dayanımı ve 800-1800 kg/cm<sup>3</sup>'lük birim hacim ağırlık değerlerini sağladığı görülmüştür.

Tüm sonuçların ışığında üretilen numuneler; hafif yapı bloğu olarak, gaz betonun, bims blokların kullanıldığı yerlerde ve yalıtım blokları olarak kullanılabilir olduğu saptanmıştır.



## KAYNAKLAR

- Aruntaş, H., Y., 2006, “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt: 21, No: 1, pp: 193-203.
- Alkadasi, N. A. N., Hundiwale, D. G., Kapadi, U. R., 2006, “Effect Of Titanate Coupling Agent On The Mechanical Properties Of Flyash Filled Chloroprene Rubber“, Polymer-Plastics Technology And Engineering 45 (3): 415-420.
- ASTM C 618, 1998, “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, No. 4.
- Akman, M. S., 2005, “Betonun Dayanımını Yükseltme Amacıyla Yapılan Eski Çalışmalar”, SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. Teknik Bülteni, Sayı: 2005/3.
- Aydın, A. C., 2006, “Yapı Malzemeleri ve İleri Beton Teknolojisi”, (<http://muhendislik/atauni/insaat/dersler/acaydin/yapimalz.pdf>), 18.01.2006
- Akman, M. S., Akçay, B., 2005, “Kimyasal Beton Katkılarının Gelişimi ve Çimentolara Uyumu”, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyum ve Sergisi, 24-25 Mart, Milli Kütüphane-Ankara.
- Aydın, S., Aytaç, A. H., Ramyar, K., 2005, “Çimento Kompozisyonunun ve Kimyasal Katkı Kökeninin Beton Özelliklerine Etkisi”, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyum ve Sergisi, 24-25 Mart, Milli Kütüphane- Ankara.
- Aytaç, A. H., Aydın, S., Ramyar, K., Çil, İ., 2005, “Kimyasal Katkı Kökeni, Çimento Kompozisyonu ve Çimento Dozajının Taze Beton Özelliklerine Etkisi”, Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harç Katkıları) Sempozyum ve Sergisi, 23-24 Mart, Ankara.
- Brown, J.H., 1982, “The strength and workability of concrete with PFA substitution”, Proc. Intern. Symp. On the Use of PFA in Concrete, Leeds University, pp. 151-161.
- Bosbach, D. ve Enders, M., 1998, “Microphotography of High Calcium Fly Ash Particle Surfaces”, Advances in Cement Research, Vol.: 10, No. 1, s. 17-24.
- Chand, N., Jain, D., 2006, “Effect Of Temperature On Electrical Behavior Of Flyash-Filled Epoxy Gradient Composites”, Journal Of Applied Polymer Science 100 (2): 1269-1276.

- Demir, İ., 2005, “Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:1, 21-24.
- Doven, A. G., Pekrioglu, A., 2005, “Material properties of high volume fly ash cement paste structural fill”, Journal Of Materials In Civil Engineering 17 (6): 686-693 Nov-Dec.
- Dursun, Ö. F., Türk, K., Yıldırım, M. Ş., 2005, “Beton Harcının Dayanım ve Dona Dayanıklılığının İyileştirilmesi için Farklı Tür Puzolan Kullanımı”, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt: 17, Sayı: 3, 481-486.
- Erdoğan, T. Y., “Beton”, 2003, Metu Press, 1. Baskı.
- Eriç, M., 1994, “Yapı Fiziği ve Malzemesi”, Literatür Yayıncılık San., ISBN: 975-7860-01-8, İstanbul.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Altun, İ. A., 2005, “Optik Mikroskop ve Görüntü İşleme Teknikleri Kullanarak Klinker Karakterizasyonu (Bölüm I- Porozite ve Kristal Boyutu Dağılımı)”, Çimento ve Beton Dünyası, Eylül-Ekim, Sayı: 57, 54-67.
- Goni, S., Guerrero, A., Luxan, M. P., Macias, A., 2000, “Dehydration of Pozzolanic Products Hydrothermally Synthesized from Flyash: Microstructure Evolution”, Materials Research Bulletin, Vol. 35, 1333-1344.
- Gürbüz, G., 2005, “Yüksek Belit Çimentoları”, Çimento ve Beton Dünyası, Mayıs-Haziran, Sayı 55, 40-44.
- Ha, T. H., Muralidharan, S., Bae, J. H., Ha, Y. C., Lee, H. G., Park, K. W., Kim, D. K., 2005, “Effect of unburnt carbon on the corrosion performance of fly ash cement mortar”, Construction And Building Materials 19 (7): 509-515 Sep.
- Jiang, Z., G., Zhao, Y., 2005, ”Mechanism And Optimal Application Of Chemical Additives For Accelerating Early Strength Of Lime-Flyash Stabilized Soils”, Journal Of Wuhan University Of Technology-Materials Science Edition 20 (3): 110-112, Sep.
- Karla, N., Harit, R. C., Sharm, S. K., 2000, “Effect of Flyash Incorporation on Soil Properties of Texturally Variant Soils”, Bioresource Technology, 75, pp: 91-93.
- Karaman, O., Arı, K., Haktanır, T., Atiş, C. D., 2005, “İki Farklı Portland Çimentolu Betonların Dayanımına Zaman ve Kür Etkisinin Araştırılması”, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı: 21, 62-68.

- Livingston, R. A., Bumrongjaroen, W., 2001, "Optimization of Silica Fume, Fly Ash and Cement Mixes for High Performance Concrete", International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky.
- Lee, S. H., Kim, H. J., Sakai, E., Daimon, M., 2003, "Effect of particle size distribution of fly ash-cement system on the fluidity of cement pastes", Cement And Concrete Research 33 (5): 763-768 May.
- Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P. K., 2002, "Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles", Materials science & Engineering A 325, pp. 333-343.
- Mishra, S. R., Kumar, S., Park, A., Rho, J., Losby, J., Hoffmeister, B.K., 2003, "Ultrasonic characterization of the curing process of PCC fly ash-cement composites", Materials Characterization 50 (4-5): 317-323, Jun.
- Mendki, P. S., Maheshwari, V. L., Kothari, R. M., 2001, "Flyash as a Post-Harvest Preservative for Five Commonly Utilized Pulses", Crop Protection 20, 241-245.
- Rao, V. V. B., Rao S. R. M., 2006, "Adoption Studies on Treatment of Textile Dyeing Industrial Effluent by Flyash", Chemical Engineering Journal 116 (1): 77-84, Feb.
- Saraswathy, V., Muralidharan, S., Thangavel, K., Srinivasan, S., 2003, "Influence of activated fly ash on corrosion-resistance and strength of concrete", Cement & Concrete Composites 25 (7): 673-680, Oct.
- Serin, G., 1999, "Pomzanın hafif beton blok duvar elemanı olarak kullanılmasının araştırılması", Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Sharma, S., K., Kalra, N., 2006, "Effect Of Flyash Incorporation On Soil Properties And Productivity Of Crops: A Review", Journal Of Scientific & Industrial Research 65 (5): 383-390, May.
- Şahmaran, M., Yaman, İ.Ö., Tokyay, M., 2004, "Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton", Beton ve Kalite, 2004/223, 77-81.
- Satapathy, L.N., 2000, "A study on the mechanical, abrasion and microstructural properties of zirconia-flyash material", Ceramics International, 26, pp:39-45.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinoğlu, A., 2003, "Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri", TÇMB, Ankara.

- Technical Bulletin-2, 2006, “Chemical Comparison of Fly Ash and Portland Cement”,Headwaters Resources, Utah, A.B.D.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., 2001, “Uçucu kül Kullanımının Betondaki Etkileri” Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi C. XIV, S. 2, 2001 Eng.& Arch. Fac. Osmangazi University, Vol. XIV, No: 2.
- Tütünlü, F., Atalay, Ü., 2001, “Utilization of Fly Ash in Manufacturing of Building Bricks”, 2001 International Ash Utilization Symposium.
- Tanosaki, T., 1998, “Characterization of Incineration Ashes in Japan”, Journal of Research of the Chichibu Onoda Cement Corp., C. 49, No. 135, s. 145-154.
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, “Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri, Cilt – 1” Nisan, 1996, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu, Yayın No: Dpt : 2434 – Öik: 491
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 2001, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Yapı Malzemeleri-I, DPT: 2615 – ÖİK: 626.
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, “Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri, Cilt – 2” Nisan, 1996, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri Çalışma Grubu Raporu, Yayın No: Dpt : 2434 – Öik: 491
- T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Müsteşarlığı, 1996, “Kömür”, Madencilik, Özel İhtisas Komisyonu, Enerji Hammaddeleri Alt Komisyonu, Mayıs, Yayın No: DPT: 2440 – ÖİK: 496.
- TS 639, Uçucu Küller, 1975, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450, Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, 1998, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 451-1, Uçucu Kül - Deney Metodları - Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Tayini, 2000, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 451-2, Uçucu Kül - Deney Metodu - Bölüm 2: Islak Eleme ile İncelik Tayini, 2000, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 197-2, Çimento - Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-2, Çimento Deney Metotları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, 2002, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 453, Gaz ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları, 1988, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 771-1, Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar), 2005, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara. (TS EN 771-1, TS 704 ve TS 705'in yerini almıştır.)
- TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, 2000, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- YAZICI, H., 2005, "Yapay Alçı – Uçucu Kül Esaslı Bağlayıcıların Mekanik Özellikleri", DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Ocak, Cilt: 7, Sayı: 1, 65-72.
- YAZICI, Ş., "Değişik Akışkanlaştırıcıların Betondaki Performansı", 2002, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Mayıs, Cilt: 4, Sayı:2, 41-52.
- Yetgin, Ş., Çavdar, A., 2005, "Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi", Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi Cilt: 17, Sayı: 4, 687-692.
- Zhang, Y. M., Sun, W., Yan, H. D., 2000, "Hydration of high-volume fly ash cement pastes", Cement & Concrete Composites 22 (6): 445-452 Dec.
- <http://www.chryso.com.tr>, 17 Ocak 2006.
- [http://www.betonsa.com.tr/04\\_hb1.asp](http://www.betonsa.com.tr/04_hb1.asp), 03.05.2006
- <http://analiz.byethost17.com>, 03.05.2006

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca her türlü konuda bana destek ve yardımcı olan danışman hocam sayın Doç.Dr. İsmail Demir'e,

Tez çalışmam süresince desteğini esirgemeyen, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'ne (TÇMB),

Çalışmalarımnda destek ve yardımda bulunan, Hüseyin Kabayel'e, Hakan Akbaba'ya ve aileme teşekkür ederim.

## ÖZGEÇMİŞ

2 Ağustos 1981 yılında Ankara'da doğdu. İlk ve orta öğrenimine Ankara'da tamamladı. 1998 yılında Ankara Yapı Meslek Lisesini birincilikle tamamladı, aynı yıl Milli Eğitim Bakanlığı tarafından düzenlenen beceri yarışmasında Ankara birinciliğini kazandı. 2003 yılında, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesini, bölüm ve fakülte birincisi olarak tamamladı. 2004 yılında Gazi üniversitesinde yüksek lisans eğitimine başladı, yine aynı yıl Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Mühendislik Fakültesinde, Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Göreve başlamasının ardından yüksek lisans eğitimine Afyon Kocatepe Üniversitesinde devam etmiştir. Halen Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesinde görevine devam etmektedir. Yabancı dili İngilizcedir. Bekardır.