

**UÇUCU KÜLDEN ÜRETİLEN SİLİS DUMANI KATKILI
GAZBETON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE
KÜR ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Kadir GÜÇLÜER
DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2011

Bu tez çalışması 109 M 245 numaralı proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**UÇUCU KÜLDEN ÜRETİLEN SİLİS DUMANI KATKILI GAZBETON
ÖRNEKLERİ ÜZERİNE KÜR ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

KADİR GÜÇLÜER

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. OSMAN ÜNAL

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2011

TEZ ONAY SAYFASI

Kadir Güçlüer tarafından hazırlanan "Uçucu Külden Üretilen Silis Dumanı Katkılı Gazbeton Örnekleri Üzerine Kür Etkisinin Araştırılması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 24/06/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman Ünal

Başkan: Doç. Dr. İsmail Demir İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi

Üye: Yrd. Doç. Dr. M.Serhat Başpınar İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi

Üye: Yrd. Doç. Dr. Osman Ünal İmza
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

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

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.....

Enstitü Müdürü

(Prof. Dr. Mevlüt Doğan)

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

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

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

beyan ederim.

24/06/2011

İmza

Kadir GÜÇLÜER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

UÇUCU KÜLDEN ÜRETİLEN SİLİS DUMANI KATKILI GAZBETON ÖRNEKLERİ ÜZERİNE KÜR ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kadir GÜÇLÜER

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL

Gazbeton, silis kumu, çimento, kireç, alçı ve su ile karışıma gözenek oluşturucu alüminyum tozu ilavesiyle elde edilen ve otoklavda buhar kürü ile sertleştirilen, hafif beton grubunda yer alan yapı malzemesidir. Bu çalışmada, gazbeton üretiminde ana hammadde olarak kullanılan silis kumu yerine uçucu kül ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentoya da %3, %6, %9 ve %12 oranlarında silis dumanı ikame edilerek gazbeton örnekleri üretilmiştir. Üretilen gazbeton karışımları 10 cm kenarlı küp kalıplara döküldükten sonra 75 °C sıcaklığındaki etüv içerisinde 24 saat bekletilmişlerdir. Kalıptan çıkarılan örnekler 177 °C'de 8 bar buhar basıncı altında 6 saat süreyle otoklav kürü uygulanmıştır. Kür işlemi tamamlanan örnekler üzerinde basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve ultrases geçiş süresi deneylerine göre bazı mekaniksel ve fiziksel özellikler belirlenmiştir. Örneklerin mikroyapıları SEM ve XRD analizleriyle gözlemlenmiştir. Örneklerin birim hacim ağırlıkları 0.6-0.7 kg/dm³ arasında olup basınç dayanımları 2.5 MPa ile 4.4 MPa arasında değişmektedir. Silis dumanı ikameli serilerde, kontrol karışımına göre birim hacim ağırlıkta azalma, basınç dayanımlarında ise artma görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı silis dumanın çimentoya %3 oranında ikame edildiği serilerde gözlenmiştir.

2011, x + 69 sayfa

Anahtar kelimeler: Uçucu kül, silis dumanı, gazbeton,

ABSTRACT

MSc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CURING ON THE FLY ASH CONCRETE
SAMPLES OF THE PRODUCED AUTOCLAVED AERATED CONCRETE DOPED
SILICA FUME

Kadir GÜÇLÜER

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Osman ÜNAL

Aerated concrete silica sand , cement, lime, gypsum and water mixture with the addition of aluminum powder obtained from the pore-forming and autoclave cured by steam curing, lightweight concrete building material of the group. In this study, the production of aerated concrete as the main raw material used in the fly ash instead of silica sand and cement used as a binder in 3%, 6%, 9% and 12% silica fume replacement ratios were produced by samples of aerated concrete. Aerated concrete mixture is poured into molds of 10 cm-sided cube produced after the oven temperature 75 C waited within 24 hours. Samples extracted from the mold 177 C 8 bars, 156⁰C 4 bars of steam pressure and release steam under the cure were cured for 6 hours. Curing process has been completed on samples compressive strength, unit weight and transit time ultrasonic experiment performed, some mechanical and physical properties were determined. SEM and XRD analysis of microstructures of the samples were observed. Unit weight of the samples were between 0.6-0.7 kg/dm³ compressive strength varies between 2.5 Mpa and 4.4MPa. Unit volume according to the weight of the mixture of silica fume control series reduction, the increase in pressure wasal so tested. The highest compressive strength of cement by 3% substitution of silica fumes were observed in the series.

2011, x + 69 pages

Key words: Flay ash, silica fume, aerated concrete,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca her türlü yardımı ve desteği gösteren başta danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Osman ÜNAL'a, sayın Doç. Dr. İsmail DEMİR'e, ve sayın Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR'a

Çalışmalarımda yardımcı olan değerli arkadaşım sayın Adnan AKER'e, her zaman rehber konumunda olan ve desteğini esirgemeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜRKLÜ ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN'a ve Yapı Laboratuvarı çalışanları Mehmet ALPÖZ ile Hüseyin KABAYELE,

Tüm öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve benim için çok değerli olan anne ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kadir GÜÇLÜER

AFYONKARAHİSAR, 2011

SİMGELER ve KISALTMA DİZİNİ

Simgeler

k	Isı iletim katsayısı
f_b	Basınç dayanımı
V	Ses üstü dalga hızı
Δ	Birim hacim ağırlık
N	Newton
μs	Mikro saniye
MPa	Megapascal
kgf	Kilogram kuvvet

Kısaltmalar

UK	Uçucu kül
SD	Silis dumanı
TS 453	Türk Standartları Enstitüsü, 453 numaralı standardı
ASTM	American Society Testing for Materials
AAC	Autoclaved Aerated Concrete
C-S-H	Kalsiyum-Silika-Hidrat

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMA DİZİNİ.....	iv
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Puzolanlar.....	3
2.1.1. Puzolanların Tanımı.....	3
2.1.2. Puzolanların Sınıflandırılması.....	4
2.1.3. Doğal Puzolanlar.....	4
2.1.3.1. Volkanik Kökenli Doğal Puzolanlar.....	6
2.1.3.1.1. Volkanik Camlar.....	6
2.1.3.1.2. Volkanik Tüfler ve Tras.....	6
2.1.3.2. Isıl İşlem Görmüş Doğal Puzolanlar.....	6
2.1.3.2.1. Killer ve Şeyller.....	6
2.1.3.2.2. Diatomitler.....	7
2.1.4. Yapay Puzolanlar.....	8
2.1.4.1. Uçucu Küller.....	8
2.1.4.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....	10
2.1.4.1.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri.....	11
2.1.4.1.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri.....	12
2.1.4.1.4. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri.....	13
2.1.4.1.5. Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri.....	15
2.1.4.2. Silis Dumanı.....	17
2.1.4.2.1. Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri.....	18
2.1.4.2.2. Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri.....	19

2.1.4.3.	Pirinç Kabuğu Külü.....	19
2.1.4.4.	Yüksek Fırın Cürufu.....	19
2.2.	Gazbeton.....	20
2.2.1.	Gazbetonun Tarihçesi ve Tanımı.....	20
2.2.2.	Gabetonun Üretimi.....	22
2.2.3.	Gazbetonun Sınıflandırılması.....	24
2.2.4.	Gazbetonun Fiziksel Özellikleri.....	25
2.2.4.1.	Mikroyapı.....	25
2.2.4.2.	Yoğunluk.....	26
2.2.4.3.	Kimyasal Özellikler.....	27
2.2.5.	Mekanik Özellikler.....	27
2.2.5.1.	Basınç Dayanımı.....	27
2.2.6.	Fonksiyonel Özellikler.....	28
2.2.6.1.	Dayanıklılık.....	28
2.2.6.2.	Termal İletkenlik.....	28
2.2.6.3.	Yangın Dayanımı.....	29
2.2.6.4.	Akustik Özellikler.....	29
2.3.	Literatür Özetleri.....	29
3.	MATERYAL ve METOD.....	38
3.1.	Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	38
3.1.1.	Uçucu Kül.....	38
3.1.1.1.	Kimyasal Analiz Sonuçları.....	38
3.1.1.2.	Mineralojik Analiz Sonuçları.....	39
3.1.1.3.	Morfolojik Analiz Sonuçları.....	40
3.1.2.	Silis Dumanı.....	41
3.1.3.	Kireç.....	44
3.1.4.	Çimento.....	44
3.1.5.	Alçı.....	45
3.1.6.	Alüminyum tozu.....	45
3.2.	Numunelerin Üretimi ve Deney Yöntemleri.....	45
3.2.1.	Birim Hacim Ağırlık.....	49
3.2.2.	Ultrases Geçiş Hızı.....	50
3.2.3.	Basınç Dayanımı Testi.....	50

3.2.4. Isı İletim Katsayısı Hesabı.....	51
4. BULGULAR.....	52
4.1. Birim Hacim Ağırlık Bulguları.....	52
4.2. Ultrases Geçiş Hızı Bulguları.....	53
4.3. Basınç Dayanımı Bulguları.....	53
4.4. Isı İletim Katsayısı Bulguları.....	60
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	61
6. KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması	4
Şekil 2.2. Uçucu külün küresel yapısı	13
Şekil 2.3. Gazbeton üretim şeması	23
Şekil 2.4. Gazbetonun sınıflandırılması	24
Şekil 2.5. (a),(b),(c) Gazbetonun mikroyapısı.	26
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan uçucu külün lazer tane boyutu analiz grafiği.....	38
Şekil 3.2. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı	40
Şekil 3.3. (a),(b),(c) Uçucu külün morfolojik yapısı.....	41
Şekil 3.4. Silis dumanın mineralojik yapısını gösteren X-ışınları difraktogramı	43
Şekil 3.5. Silis dumanı SEM görüntüsü	43
Şekil 3.6. Silis dumanı tane boyutu dağılımı.....	44
Şekil 4.1. Serilere ait birim hacim ağırlık değerleri.....	52
Şekil 4.2. Serilere ait ultrases geçiş hızı değerleri	53
Şekil 4.3. Buhar kürü uygulanan serilere ait basınç dayanımı grafiği	54
Şekil 4.4. 4 Bar otoklav kürü uygulanan serilere ait basınç dayanımı grafiği.....	54
Şekil 4.5. 8 Bar otoklav kürü uygulanan serilere ait basınç dayanım grafiği	54
Şekil 4.6. Kür şartlarına göre karşılaştırmalı basınç dayanımı grafiği.....	55
Şekil 4.7. (a),(b) Buhar kürü uygulanan serilerde etringit oluşumu	56
Şekil 4.8. Buhar kürü sonrası iç yapı EDX analizi	56
Şekil 4.9. Otoklav kürü sonrasında alçı kristalleri etrafında oluşan mikro çatlaklar ve EDX analizi.....	57
Şekil 4.10. Farklı otoklav şartları altında iç yapı gelişimleri (a: 8 bar otoklav, b: ticari gaz beton).....	58
Şekil 4.11. Kuvars-kireç-çimento-alçı karışımıyla başlayan ticari gazbeton üretiminde fazların zamana bağlı gelişim ve kararlılık grafiği.....	59
Şekil 4.12. Otoklav kürü sonucu elde edilen XRD analizi.....	59
Şekil 4.13. Silis dumanı içeren numunelerde SEM görüntüleri	60

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Numunelerin etüvde bekletilmesi.....	47
Resim 3.2 Numunelerin buhar kürüne tabi tutulması.....	47
Resim 3.3 Otoklav.....	48
Resim 3.4 Numunelerin etüvde bekletilmesi.....	48
Resim 3.5 Numunelerin ultrases geçiş hızlarının ölçülmesi.....	49
Resim 3.6 Tek eksenli basınç presi.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Türkiye’de bulunan kömüre dayalı termik enerji santralleri.....	2
Çizelge 2.1 Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin miktarı.....	8
Çizelge 2.2 Uçucu Kül ile ilgili türk standartları.....	9
Çizelge 2.3 ASTM C 618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması.....	10
Çizelge 2.4 TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması.....	10
Çizelge 2.5 Silis dumanlarının kimyasal bileşimleri.....	18
Çizelge 2.6 Gazbetonun birim hacim ağırlık ve basınç dayanımına göre sınıflandırılması...	25
Çizelge 2.7 Yoğunluk değeri – basınç dayanımı ilişkisi.....	28
Çizelge 3.1 Uçucu külün kimyasal yapısı.....	39
Çizelge 3.2 Silis dumanı kimyasal bileşimi.....	42
Çizelge 3.3 Kirecin kimyasal bileşimi.....	44
Çizelge 3.4 CEM I 42,5 R tipi Portland kompoze çimentosu özellikleri.....	45
Çizelge 3.5 Karışım oranları.....	46

1. GİRİŞ

Gazbeton, silis kumunun çimento esaslı bağlayıcı veya kireçle sulu ortamda karıştırılması ve karışıma gözenek oluşturucu alüminyum tozu ilavesi ile oluşturulan ve hafif beton sınıfında yer alan bir yapı malzemesidir.

Gazbeton üretiminde ana madde olan silis kumu ve kuvarsitin yerine endüstriyel atık olan, kimyasal bileşimlerinde yüksek oranda SiO_2 bulunduran ve puzolanik özelliği bulunan uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin kullanılabilirliği malzeme bilimciler için önemli bir çalışma alanı olmaktadır.

Termik güç santrallerinde düşük kalorili kömür 0.09 mm inceliğe kadar öğütülmekte ve su ile yanma fırınına püskürtülmektedir. Fırın içinde ortalama 1100–1600 °C sıcaklıkta yanan kömür tanecikleri, kısmen adi kül (cüruf) şeklinde kazan altında toplanmakta ve su ile uzaklaştırılmaktadır. Bu kazan altı cürufu 20µm –3mm büyüklüğünde taneciklerden ibarettir. Külün geri kalan ve daha ince yapılı kısmı baca gazları ile sürüklenerek önce siklonlar daha sonra da elektrofiltrelerde tutulur. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas ederek, ani soğuma sonucu puzolanik özellik kazanan bu küllere hafif olmaları nedeniyle uçucu kül adı verilmektedir (Yıldız 1998).

Türkiye’de termik santrallerde 2003 yılında 11,84 milyon ton, 2004 yılında 13,34 milyon ton ve 2006 yılında 16,01 milyon ton uçucu kül açığa çıkmıştır. 2003-2006 yılları arasında oluşan atığın ortalama % 10’u tesis dışında geri kazanılmış, % 90’ı ise bertaraf edilmiştir. Bertaraf edilen atığın ortalama % 79’u kül dağı/barajında depolanmıştır. Termik santrallerin atık bileşimi içindeki en büyük pay, mineral atıklardan (kül, cüruf, uçucu kül ve alçıtaşı) meydana gelmiştir. Türkiye’de 2020 yılına kadar yıllık uçucu kül miktarının 50 milyon tonu geçmesi beklenmektedir (Demir vd. 2008).

Halen Türkiye'deki termik santrallerde ortaya çıkan uçucu külün % 1' inden daha azı inşaat uygulamalarında kullanılabilir (Demir 2005).

Çizelge 1.1. Türkiye’de bulunan kömüre dayalı termik enerji santralleri (Aruntaş 2006).

No	Santral adı	Yakıt cinsi	Kurulu güç (MW)	Bulunduğu il
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

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kok kömürü ve odun parçacıkları ile redüksiyonu sonucunda elde edilen çok ince taneli tozdur. Yüksek sıcaklıkta gaz haline geçen SiO, elektrik ark fırınının daha düşük sıcaklıktaki üst kısımlarında ya da sisteme ilave edilen kollektörlerde hızla okside olur ve amorf yapıda SiO₂ olarak yoğunlaşarak yüzey alanı 220,000-300,000 cm²/g olan silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur (Kurt 2007). Ana bileşeni 1 µm’den küçük, küresel, amorf, camsı silis (SiO₂) partiküllerinden oluşan bu malzeme, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silis dumanı genel olarak inşaat endüstrisinde çimento ve beton katkısı olarak kullanılmaktadır. Betonda yüksek dayanım elde edebilmek için silis dumanı tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın ana hammaddelerini uçucu kül ve silis dumanı oluşturmaktadır. Bu malzemeler ülke ekonomisi ve çevre kirliliği açısından büyük önem teşkil etmektedir. Bu malzemelerin geri dönüşümünün sağlanması ile birlikte hem çevre kirliliği önlenmiş olacak, hemde gazbeton üretiminde hammadde korunumu ve ekonomiklik sağlanacaktır. Bu amaçla çalışmada uçucu külden üretilen silis dumanı katkılı gazbeton örnekleri üzerine kür etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Puzolanlar

2.1.1. Puzolanların Tanımı

“Puzolan” ismi, İtalya’daki Vezüv yanardağının eteklerinde bulunan “Pozzuoli” isimli kasabanın isminden alınmıştır. Milattan yaklaşık 100 yıl önce, eski Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürülmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcı özelliği gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle, su altında sertleşme gösterebilen bu malzeme “puzolan” ismiyle anılmaya başlanmıştır. Günümüzde, ince taneli durumdayken söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli ve alüminli malzemelerin tümü aynı isimle anılmaktadır (Erdoğan 2003).

ASTM C 618’e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak sulu ortamda ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Reaktif SiO_2 miktarı kütlece %25’den az olmamalıdır.

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlamış olması gerekmektedir:

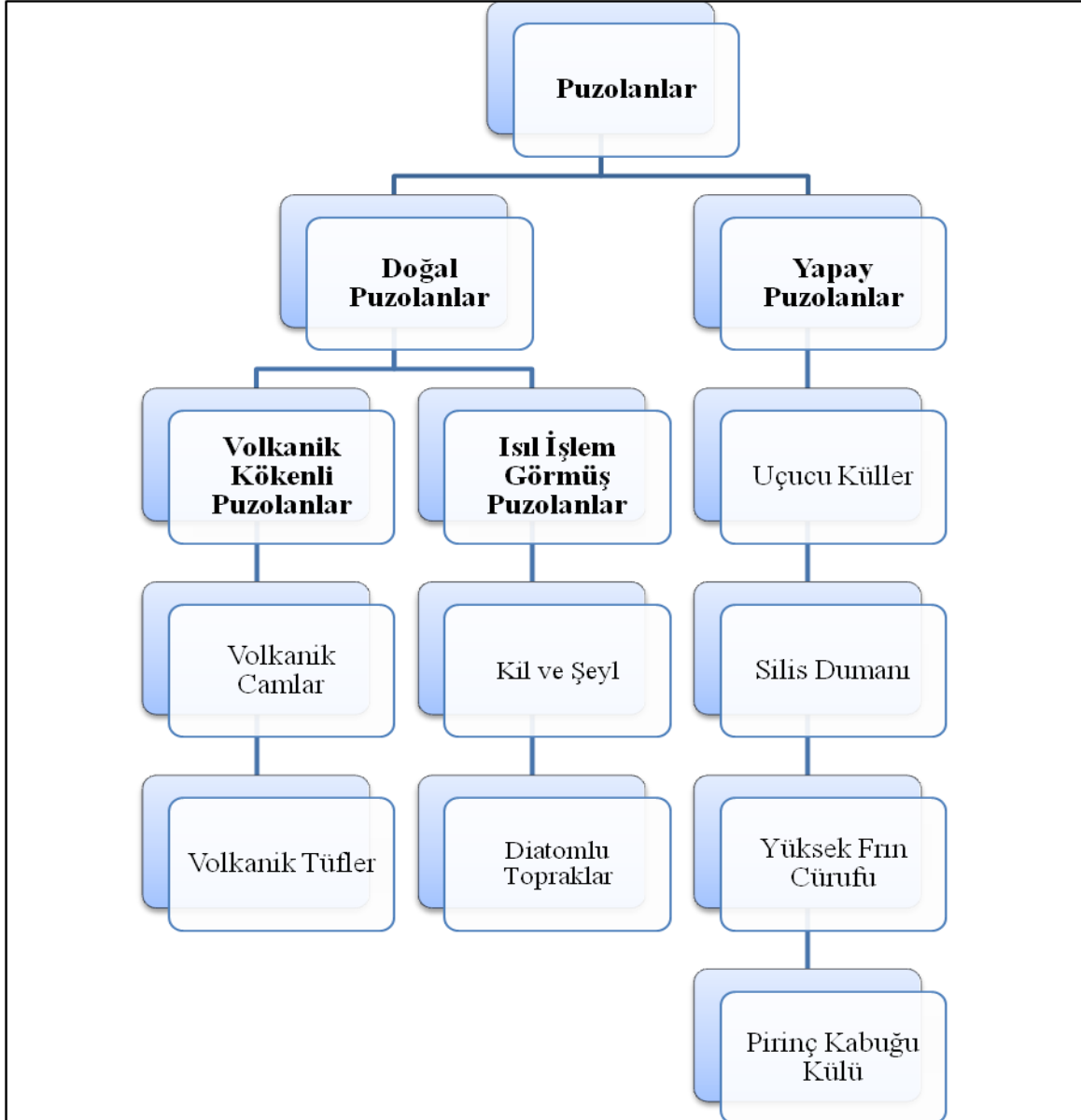
- İçerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “ $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ ” miktarının en az %70 olması istenmektedir.)

- Amorf yapıya sahip olmalıdır.

- Doğal haliyle çok ince taneli durumda, veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır (Erdoğan ve Erdoğan 2007).

2.1.2. Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki ayrı sınıfta adlandırılmaktadırlar (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Puzolanların sınıflandırılması

2.1.3. Doğal Puzolanlar

Doğada bulunan ve bir ön işlem yapılarak veya doğrudan öğütülerek kullanılan puzolanlar volkanik küller, tüf, tras vb. bu gruba girer. Yurdumuzda Kayseri - Nevşehir yöresinde bulunmaktadır. Doğal puzolanlar, başlangıcından sonra az veya çok değişikliğe uğramış volkanik kökenli doğal tortul kayalardan oluşurlar. Doğal puzolanlar; Piroklastik kayalar

(Volkan tüfleri, diyatomit, tras, killi maddeler ve zeolitli maddeler vb.), değişik orijinli maddeler (beyaz İtalyan toprakları) ve kırıntı taşlar olarak sınıflandırılmaktadır. Bu tip puzolanik maddeler, öğütülerek kullanıldığı gibi bazıları doğal olarak da kullanılmaktadır (Gündeşli 2008).

Doğal puzolanların çoğu piroklastik kayalardır. Piroklastik kayalar bir volkanik patlama sırasında volkan bacasından havaya fırlatılır. Havaya fırlatılan volkanik parçacıklar zamanla yatak oluştururlar. Piroklastik kayalar oluşumları sırasındaki koşulların bir sonucu olarak iki önemli karakteristik özelliğe sahiptir:

a- Maddelerin hızlı soğumasına bağlı olarak fışkıрма sürecinde oluşan sıvı kristalleşmez ve volkanik cam olarak katılaşır.

b- Yeryüzüne yaklaştığında basınç azalır ve gazların (genellikle H₂O) serbest kalmasına neden olur.

Boşluklu ve kabarcıklı bir yapı meydana gelir. Bu yapı ya olduğu gibi kalır veya serbest kalan gazların patlayıcı etkisiyle az çok bozularak kavisli ve iğnemsî bir yapı oluşur. Her iki durumda da özgül yüzey büyüktür. Fışkıran madde katılma sürecinde camsı bir yapı kazanmaya başlar. Fakat, sadece camsı fazdan oluşan Piroklastik kaya yoktur. Bunun sebepleri aşağıda verilmiştir:

a-Fışkıran parçacıklar az ya da çok miktarda (%1 - 61) fenokristaller şeklinde kristalize madde içerirler. Piroklastik kayalarda feldspat, kuvars, biotit, magnetit, hornblend ve ojit en fazla bulunan fenokristallerdir.

b- Volkanik camsı fazın kimyasal kararsızlığından dolayı, mevcut olan mineraller değişime uğrar ve yeni mineraller oluşur. Bu dönüşümün sonucu olarak feldspat ve tridimit önceden oluşan camsı yapının yüzeyindeki gaz fazlarının etkisiyle büyüyebilir. Hava koşullarının kimyasal ve fiziksel değişikliklerin etkisi, zeolitlerin ve kil minerallerinin oluşumuna neden olur.

c-Buhar fazında ve/veya devitrifikasyonla meydana gelen mineraller; feldspat, kristobalit, tridimitdir.

d-Bozunma ve diajenezle meydana gelen mineraller; kil ve zeolit (Gündeşli 2008).

2.1.3.1. Volkanik Kökenli Doğal Puzolanlar

Erimiş mağmanın püskürmesi ile oluşmuşlardır. Magmanın şiddetli püskürmesi sonucunda, yüksek puzolanik aktiviteye sahip camsı malzemeler oluşurken daha zayıf şiddetteki püskürmeler, camsı volkanik malzemelere kıyasla, kireçle daha az kimyasal reaksiyon yapan volkanik külleri meydana getirir. Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar ve volkanik küller olarak çeşitleri vardır (Gündeşli 2008).

2.1.3.1.1. Volkanik Camlar

Yunanistan'a bağlı Santorin adası toprağı, İtalya'nın Bacoli ve Japonya'nın Shirasu en iyi bilinen volkanik cam örnekleridir. Volkanik camlar, şiddetli volkanik püskürmeler esnasında bırakılan sıvı lavların soğuması sonucu oluşurlar. Bu malzemeler puzolanik aktivite karakteristiklerini esas olarak, düzensiz yapıdaki alümina silikat camlarından elde ederler. Küçük miktarlarda reaktif olmayan kuvars, feldspat ve mika gibi minarel kristalleri, camsı faz içinde bulunabilir. İnce öğütülmeleri halinde oldukça güçlü puzolanik özellikleri vardır (Ün 2007).

2.1.3.1.2. Volkanik Tüfler ve Tras

İtalya'da Segni - latium, Almanya'da Ren trası, Türkiye'de Kula cürufu ve Kayseri trası volkanik tüflerin ve trasların tipik örnekleridir. Riyolit tüfler, dazit tüfler ve zeolit tüfler en iyi puzolanik malzemelerdir. Andezit, bazalt ve bazalt tüfü, genellikle kalite ve performans açısından yeterli değildir. Değişik tip traslar içinde, augite, apatit, biotit, magnetit, muskovit, hematit, kristobalit, kaolinit, illit, mika ve hornblend gibi mineraller mevcuttur (Ün 2007).

2.1.3.2. Isıl İşlem Görmüş Doğal Puzolanlar

2.1.3.2.1. Killer ve Şeyller

Killer ve killi zeminler, plaka veya çubuk şekline sahip olan, boyutları 0,002 mm' den daha küçük parçalardan oluşurlar. Küçük parçalar, orijinal kayaların daha az stabil olan bileşenlerinin kırılmasından meydana gelen ve çoğunlukla alümina silikat içeren kil minarelerinden oluşurlar. Şeyller, killer ile benzer bileşenlere sahiptir ancak su içerikleri

killerden daha azdır. Kil mineralleri kristal yapılu olup, killerin ve şeylerin hammadde formları puzolanik özellik göstermez. Ancak 700°C ile 900°C arasında ısı ile işlemle kalsine olurlar ve puzolanik özellik kazanırlar. Isıl işlem killerin ve şeylerin kristal yapılarını bozar ve yarı amorf şekle veya bozulmuş alümina silikat yapısına dönüştürür.

Laterit toprakları, limonit veya hematit gibi yüksek miktarda demir minerallerine sahiptir. Hava ile temas edince tuğla gibi sertleşirler. Laterit kelimesi Latince'de tuğla anlamına gelmektedir. Boksitli topraklar ise alüminyum mineralleri içerir. Isıl işlem görmüş silisli topraklar, lateritli veya boksitli topraklar gibi silika içeriği açısından zengin değildir. Laterit ve boksit içeren topraklar tropikal ortamlarda kimyasal bozulma sonucu oluşur. Puzolanik aktivite normal olarak, ısı ile işlem görmüş kildeki reaktif silis ve kalsiyum iyonlarının reaksiyonu ile oluşur.

Ancak kireç, ısı ile işlem görmüş laterit ve boksitle de reaksiyon yapar. Muhtemelen silis kadar, demir ve alüminyum da ısı ile işlemle bozulmuş yapıdaki boşlukları doldurabilir (Ün 2007). Pişmiş killer, geleneksel olarak atık tuğla ve fayansların öğütülerek ince bir toz haline getirilmesi ile de üretilmektedir. Bu yöntemle elde edilen malzemeler oldukça değişken puzolanik aktivite gösterir. Killere için en yaygın olarak kullanılan ısı ile işlem yöntemi döner fırınlarda yapılmaktadır. Isıl işlem süresi ise 1 ile 2 saat arasındadır. Ayrıca, düşey milli fırınlarda bu amaçla kullanılmaktadır (Ün 2007).

2.1.3.2.2. Diatomitler

Diatomitler, hücre duvarları silikadan oluşmuş, opal ve hidrate silika içeren, mikroskopik su bitkisi olan diatomların kalıntılarıdır. Bazı topraklarda bulunan bu organik kalıntılar %94 oranında silis içerirler. Diatomitlerin sahip olduğu puzolanik aktivite, içerdiği amorf silis miktarına bağlıdır.

Yüksek miktarda kil minerali içeren diatomitlerde, killere puzolanik aktiviteyi azaltır. Bu yüzden bazı çeşitleri, 760°C ile 1000°C arasında ısı ile işlem görerek puzolanik aktiviteleri artırılır. Büyük miktarlarda diatomit yataklarına A.B.D. California'da, Cezayir'de, Almanya, Danimarka ve Kanada'da rastlanır (Ün, 2007).

Doğal puzolanlardaki oksitlerin miktarı Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Bazı doğal puzolanlardaki oksitlerin miktarı (Erdoğan 2003).

	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	Alkali
Volkanik cam	65.1	14.5	5.5	3.0	1.1	6.5
Volkanik tüf	52.1	18.3	5.8	4.9	1.2	6.6
Diatomlu toprak	86.0	2.3	1.8	-	0.6	0.4
Pişirilmiş kil	42.2	16.1	7.0	21.8	1.9	1.3

2.1.4. Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve pirinç kabuğu külü olmak üzere 4 başlık altında sınıflandırılmaktadır.

2.1.4.1. Uçucu Küller

Elektrik enerjisi üretimi için, termik enerji santrallerinin çoğunda yakıt olarak pulverize kömür kullanılmaktadır. Kömür, %80’inin 75 µm elekten geçebilecek inceliğe sahip olacak tarzda öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir.

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).

Gazlarla birlikte çok büyük miktarlarda külün dışarı çıkması durumunda, termik santralin çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkarak küller birtakım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolara

kanalize edilmektedir. Daha sonra da, silolardan, konveyör bandlarla veya başka yöntemlerle, termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak depolanmaktadır (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. 2009).

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 (Görhan 2006).

Çizelge 2.2. Uçucu kül ile ilgili Türk standartları (Aruntaş 2006).

Standart no	Standardın 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

Türk Standardları Enstitüsü, UK ile ilgili olarak beş tane standart yayınlamıştır. Bu standartlara ait bilgiler, Çizelge 2.2’de sunulmuştur.

2.1.4.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları baz alınmaktadır. ASTM C 618’e göre F ve C sınıfı olarak sınıflandırılmaktadır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. ASTM C 618'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması (Erdoğan2003,Ün 2007)

Sınıfı	Tanımı
F	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq \% 70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller). Yalnızca puzolanik özelliğe sahip.
C	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \geq \% 50$ linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10 dan fazla olabilir. (Yüksek Kireçli Uçucu Kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip.

TS EN 197-1’e göre ise V sınıfı silissi ve W kalkersi olmak üzere iki gruba ayrılırlar (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. TS EN 197-1'e göre uçucu küllerin sınıflandırılması (Türker vd. 2009)

Sınıfı	Tanımı
V	Çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel tanciklerden meydana gelen ince bir toz olup, esas olarak reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşur. Bu küllerde reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan az, reaktif silis miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir.
W	Hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşur. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10’dan daha fazla, reaktif silis miktarının da %25’den fazla olması gerekmektedir.

UK, yapısındaki kireç ve SO₃ miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

- a) Esas yapısı siliko alüminatlardan meydana gelen, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ (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 diğerlerine göre daha fazla SO₃ ve CaO ihtiva eden sülfö kalsik UK'lerdir (Aruntaş 2006).

2.1.4.1.2. Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri kömürün yakılma ve depolanma tekniklerinden önemli derecede etkilenmektedir. Temelde dört farklı tipte kömürün ısı değerleri, kimyasal içerikleri, kül içerikleri ve orijinleri birbirinden farklıdır. Bu dört farklı tip kömür antrasit, bitümlü, yarı bitümlü ve linyit kömürleridir. Bitümlü kömürlerin uçucu küllerinin kimyasal içerikleri temel olarak silika, alümina, demir oksit ve kalsiyum'dan oluşmaktadır. Linyit ve yarı bitümlü kömürlerin uçucu küllerinde ise kalsiyum ve magnezyum oksit oranı daha yüksek, silika ve demir oksit yüzdesi ise bitümlü kömüre göre daha düşüktür (Ahmaruzzaman 2010).

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve CaO olup, diğerleri SO₃, 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 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve CaO'ın miktarları, uçucu külün silissi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 olarak ve CaO %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır.

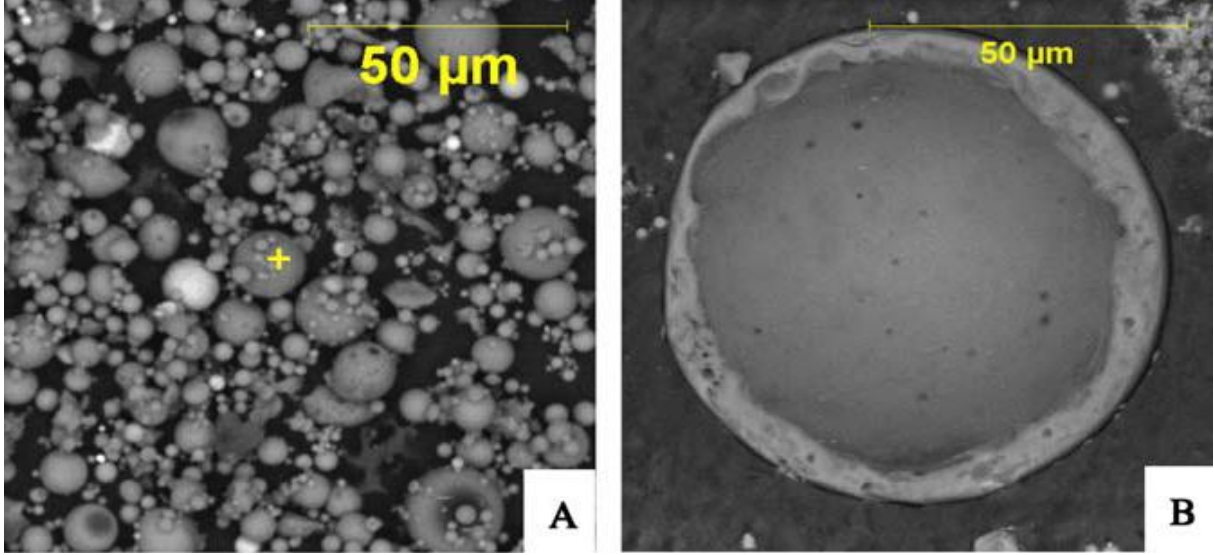
Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5.0, alkali oksitler (Na₂O + K₂O) % 5.0'in altında bulunmaktadır. SO₃, genellikle % 0.2-2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre, % 10 'a kadar yükselmektedir. Ancak standartlardan özellikle TS EN 450 standardı, SO₃ değerini en fazla % 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 CO₂ 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).

2.1.4.1.3. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu kül içi dolu veya boş olan çoğunlukla camsı yapıda olan ince tozlu taneçiklerden oluşmaktadır (Ahmaruzzaman 2010). UK, genellikle gri renktedir ve rengi, içindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir hal almaktadır. UK, % 60-90 camsı bileşen ihtiva eden çok ince taneçiklerden meydana gelmektedir. UK'ün tane şekli, yuvarlaktır ve çapları, 1-200 µm arasında değişir. Taneçiklerin yaklaşık % 75'inin çapı 45 µm'den, % 50'den çoğu ise 20 µm'den daha küçüktür. UK'ün yoğunluğu, 2.2- 2.7 g/cm₃ dolayındadır . UK'ün özgül yüzeyi, çimento inceliğine yakın olup öğütme yapılmadan kullanılabileceğini göstermektedir (Aruntaş 2006).



Şekil 2.2. Uçucu külün küresel yapısı (Kutchko and Kim 2006)

2.1.4.1.4. Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

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, camı (kristalsız) ve kristal yapılu bileşenlerden oluşmaktadır.

Genellikle düşük CaO içeren küller başta camı faz ve minör olarak da kuvars (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), manyetit (Fe_3O_4) içermekte; yüksek CaO' lü uçucu küller kuvars, hematit, anhidrit (CaSO_4), serbest kireç, C_3A ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), CS ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), C_2S ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), 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 camı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanı sıra yüksek kireçli küllerde kalsit, portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), trisülfoalüminat ($4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ve mullit' de bulunabilmektedir. Her iki külde de alkali feldispatlara rastlanmaktadır.

Düşük ve yüksek kireçli uçucu küllerin camı fazı karakterize eden X-ışınları difraksiyon piklerinin maksimum durumları da birbirinden farklıdır. Camı fazın difraksiyon pikinin maksimum olduğu bölge düşük kireçli uçucu külde $22-27^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) bölgesinde iken, yüksek kireçlide bu bölge $30-34^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) bölgesinde yer almaktadır. Silissi camı fazın $22-34^\circ 2\theta$ 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_2 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 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 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 (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 SO_3 fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişmesi (aktif alümina ve 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 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. 2009).

2.1.4.1.5. Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikleri

Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1-150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak 2,1-2,7 (ortalama 2,4) g/cm³ 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).

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 (Görhan 2006).

Tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında; kömürün orijini ve üniform 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 hem camsı küresel hem de düzensiz 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 köseli, 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 arttırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır.

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. 2009).

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 gr/cm³'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 gr/cm³ 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 gr/cm³ arasında olan metal matrislerin yoğunluğuyla karşılaştırıldığında, 0,4-0,7 gr/cm³ arasında olan önemli düşük yoğunluktan 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 külde ise; tanelerin boyutu arttıkça mullit yoğunluğu azalmakta, kuvars ise tane boyutuna göre değişim göstermektedir.

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

Katı uçucu külün aksine, boşluklu uçucu külde 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 (Görhan 2006).

2.1.4.2. Silis Dumanı

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarstitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucunda elde edilen çok ince taneli tozudur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf olarak SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur.

Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır (Yeğinobalı 2009).

Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Tesisleri'nde tutulan silis dumanları ferrosilisyum ve silikoferrokrom alaşımları üreten işletmenin yan ürünüdür. Silisyum ve ferrosilikon bileşiği, gaz akışını kolaylaştırmak için özel çubuklar yerleştirilmiş elektrik arklı fırında kömürün yakılması ile kuvarsin (SiO₂) indirgenmesi sonucunda oluşmaktadır. Ferrosilikon üretilirken, ortama demir ilave edilir. Bunun yanı sıra SiO₂'nin silisyuma indirgenmesi direkt olmaz, özellikle fırın bölgesinde gaz halinde suboksit (SiO) meydana gelmektedir. Bu SiO gazının bir kısmı fırının üst kısmındaki diğer yakma gazları ile karışmaktadır. Daha sonra SiO dumanı havanın oksijeni ile temas ederek çok ince camsı tanecikler halinde yoğunlaşarak silis dumanı adını alır (Ekinci 1995).

2.1.4.2.1.Silis Dumanının Kimyasal Özellikleri

Silis dumanındaki SiO₂ miktarı, genellikle, %85'in üzerindedir. Bunun yanı sıra, çok küçük miktarda bazı maddelerde bulunabilmektedir. Çizelge 2.5'de ABD'de, Norveç'te ve Türkiye'de üretilen silis dumanlarının kimyasal içerikleri verilmektedir.

Silis dumanındaki "SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃" miktarının yüksek olması, puzolanik aktivitenin daha iyi olmasına yol açmaktadır.

MgO'nun, kükürt'ün ve alkali miktarlarının yüksek olması sertleşmiş betonda genişlemelere yol açabilir. Betonda genişleme yaratabilecek bu maddelerin miktarları silis dumanının yapısında çok düşüktür.

Kızdırma kaybı değerinin %85 - %95'i silis içerisinde yer alan yanmamış kömür taneciklerinden oluşmaktadır. O nedenle, çoğu zaman, bu iki değer eş anlamda kabul edilmektedirler. Silis dumanında karbon miktarının fazla olması, sürüklenmiş beton üretiminde kullanılacak hava sürükleyici katkı miktarını artırmaktadır. Kanada standartları, silis dumanındaki karbon miktarının %6'yı geçmemesi gerektiğini belirtmektedir (Erdoğan 2003).

Çizelge 2.5. Silis dumanlarının kimyasal bileşimleri (Erdoğan 2003)

İçerik	ABD	Norveç	Türkiye
SiO ₂	90.0 – 93.0	90.0 – 96.0	93.0 – 95.0
C	1.3 – 2.6	0.5 – 1.4	0.8 – 1.0
Fe ₂ O ₃	0.4 – 0.7	0.2 – 0.8	0.4 – 1.0
Al ₂ O ₃	0.5 – 1.6	0.5 – 3.0	0.4 – 1.4
MgO	0.3 – 0.5	0.5 – 1.5	1.0 – 1.5
CaO	0.5 – 0.8	0.1 – 0.5	0.6 – 1.0
Na ₂ O	0.1 – 0.3	0.2 – 0.7	0.1 – 0.4
K ₂ O	1.0 – 1.2	0.4 – 1.0	0.5 – 1.0
S	0.1 – 0.2	0.1 – 0.4	0.1 – 0.3
Kızdırma Kaybı	1.4 – 2.8	0.7 – 2.5	0.5 – 1.0

2.1.4.2. Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye kadar değişiklik göstermektedir. Karbon içeriği arttıkça renk daha koyu olmaktadır. Su ile birleşmiş durumda, siyaha yakın bir renk sergilemektedir.

Silis dumanını oluşturan taneciklerin boyutları 0.1 – 0.2 µm kadardır. 45 µm boyutlu elekten elendiğinde, elek üzerinde kalan taneler aşırı büyük boyutlu taneler kabul edilmektedir. Bu tür tanelerin miktarı genellikle %6'nın altındadır.

Silis dumanının inceliği çimentonun ve diğer puzolanların inceliğini ölçmek için kullanılan Blaine yöntemiyle tayin edilememektedir. Özgül yüzey tayini için nitrojen emme yöntemi kullanılmaktadır. Silis dumanının özgül yüzeyi 130.000 – 280.000 cm²/g arasında değişmektedir. Beton katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanının özgül yüzeyi, genellikle, 200.000 cm²/g civarındadır.

Silis dumanının özgül ağırlığı 2.2 – 2.3 gr/cm³, birim ağırlığı üretildiği haliyle, 240 – 300 kg/m³ civarındadır. Silis dumanı çok ince taneli olduğundan, su ihtiyacı oldukça yüksektir. Ayrıca, çok kuvvetli bir puzolanik bağlayıcılık göstermektedir (Erdoğan 2003).

2.1.4.3. Pirinç Kabuğu Külü

Pirinç kabuğu, çeltik üretimi sonunda elde edilen zirai ürün atığıdır. Pirinç kabuğunun yapısındaki SiO₂, kabuklar yandıktan sonra elde edilen kül hızlı bir şekilde soğutulursa amorf, yavaş bir şekilde soğutulursa kristal SiO₂ oluşur. Amorf şekilde özgül yüzeyi 50-60 m²/g gibi büyük bir değerdedir. Bu nedenle puzolanik aktivitesi yüksektir. Doğu Asya ülkelerinde yaygın olarak bulunmaktadır (Karakurt 2008).

2.1.4.4. Yüksek Fırın Cürufu

Demir cevherleri doğada esas olarak içerdikleri demir oksit bileşenlerinin yanı sıra silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi bazı yabancı maddelerle bir arada bulunmaktadır.

Yüksek fırın cürufu demir sanayinin bir yan ürünüdür ve kalkerin, kok dan gelen kül ve cevherden demirin ayrılması ve indirgenmesinden sonra geri kalan silisli ve alüminyumlu atık ile ergitilmesinin sonucunda oluşmaktadır.

Fırındaki yüksek sıcaklık nedeniyle eriyik hale gelen ve CaO, SiO₂, Al₂O₃ gibi oksitleri içeren cüruf, ani olarak (suda) soğutulduğu takdirde, gri kum parçacıkları boyutunda amorf yapıya sahip granüle bir durum kazanmaktadır.

Yüksek fırında pik demir elde edilirken demir cevheri içindeki SiO₂ ve Al₂O₃ içeren gayri saflıklar yumuşatıcı olarak katılan kalkerdeki CaO tarafından bağlanır. Bu şekilde oluşan cürufun bileşimi portland çimentosuna büyük benzerlik gösterir. Fırın çıkışında hızla soğutulması ve en az 2/3 oranında camsı faz içermesi gerekir. Ayrıca içindeki CaO, MgO ve SiO₂ miktarları toplamı gene en az 2/ 3 oranında olmalıdır. CaO + MgO/SiO₂ orantısının ise 1 den fazla olması istenmektedir. Türkiye’de demir-çelik üretimi esnasında elde edilen atık Y.F.C. miktarı yaklaşık olarak 690.000 ton/yıldır (Duman 2010).

2.2. Gazbeton

2.2.1. Gazbetonun Tarihçesi ve Tanımı

19. yüzyılda, çimento ve betonun keşfinden sonra daha hafif ve ısı yalıtımı daha yüksek inşaat malzemesi arayışı, 20. yüzyılın başında Johan Axel Eriksson isimli İsveçli bir mimarın keşfi ile noktalanmıştır. Eriksson; ahşabın özelliklerine sahip, yüksek ısı yalıtımı sağlayan, sağlam, kolay işlenebilen, yanmayan ve çürümeyen bir yapı malzemesi arayışı içindeydi. O dönemde, ısı yalıtım özelliği kötü, küçük ebatlı ve ağır yapı blokları kullanılmaktaydı. Eriksson, yaptığı çalışma ve araştırmaların sonunda, kuvarsit, kireç ve suyla, oldukça gözenekli bir malzeme üretmeyi başardı. Bütün dünyada, neredeyse sınırsız miktarda ve yaygın olarak bulunan bu hammaddeler, çok sayıda gözeneği olan bir yapı malzemesi elde etmek için prosten geçirilmekteydi. Johan Axel Eriksson, daha sonra literatür adı gazbeton olarak anılacak buluşunu 1924 yılında bu malzemeyi geliştirdiği yerin adı olan küçük İsveç kasabası Yxhult ile, İsveç dilinde beton anlamına gelen betong kelimesinin karışımından elde edilen YTONG adı ile patentlendirdi.

Gazbeton, hassas bir kimyevi prosesle elde edilen, beton veya geleneksel kagir malzemenin, beşte biri ağırlığında, buna ilaveten, içindeki hidrojen habbecikleri sayesinde ısı geçirgenliği de, beşte bir mertebesine indirilmiş, bir cins hafif beton olarak yapı sektöründe aranır bir malzeme oluyordu. Kimyevi reaksiyonda meydana gelen hidrojen habbecikleri dolayısıyla bu malzemeye gazbeton adı verilmiştir.

Ytong'a olağanüstü ürün özelliklerini veren gözenekleri ve kalsiyum silikatın katı yapısıdır. Bu özellikler; yüksek ve düşük sıcaklıklara karşı mükemmel ısı yalıtımı, kolay ve akılcı kullanım, evrensel uygulama, iş gücü verimliliği ve yüksek enerji tasarrufudur.

Çevre dostu ve enerji korunumlu Ytong, modern çağımızın tüm gereklerini yerine getirmektedir. Üretim sürecinde kesinlikle çevre kirliliği yaratmaz, tehlikeli atıklar oluşturmaz ve ülke ekonomisi için değerli hammaddeler asla heba edilmez. Üretiminde düşük sıcaklıktaki buhar ile sertleştirme süreci enerji tasarrufu sağlar ve enerji yeniden kazanılarak, maksimum enerji geri kazanımı elde edilir. Ytong, 2. Dünya savaşından sonra hafiflik ve enerji tasarrufundan dolayı, Alman ekonomi Bakanı Ludwig Erhard desteğiyle Almanya konut yapımında önemli rol almıştır. Ytongun endüstriyel üretiminin başlamasının ardından birçok rakip de bu sahada faaliyete geçmiştir. O tarihten bu yana, Almanya merkezinde yapılan devamlı araştırmalar sayesinde, Ytong en ileri teknolojiye ulaşmış ve dünyada yaygın olarak en fazla kullanılan gazbeton olmuştur.

Ülkemizde Ytong Gazbeton Yapı Malzeme ve Elemanları ilk olarak 1950'lerde Hilton Oteli inşaatında, Almanya'dan ithal edilerek uygulanmıştır. Bilahare, 1960larda ilk Ytong fabrikası İstanbul Pendik'te, üretime geçmiştir. Bugün dünyada, proses ve kalite olarak bazen birbirinden çok farklı, 50ye yakın, gazbeton markası mevcuttur (İnt kaynağı 1).

Otoklavlanmış hücresel beton (aynı zamanda otoklavda havalandırılmış beton olarak da bilinen) hafif yapı malzemelerinden özel bir tanesidir. Pulverize silisli malzemeler (kum, cüruf, ya da uçucu kül) çimento ve/veya kireç, ve su ile oluşan harca gaz oluşturucu alüminyum tozu ilavesi ile üretilmektedir. Alüminyum tozu ile su arasında oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda oluşan hidrojen, harcın kabarmasına ve 0.5mm'den 1.5mm'ye kadar makroporların oluşmasını sağlar. Bu malzeme otoklavda 6-12 saat arası buhar kürüne tabi tutulur. Malzemenin sertleşmiş harç yapısı genellikle kalsiyum silikat hidrat'dan oluşmaktadır. Gözenekli bu yapı malzemesinin yoğunluğu 300 ile 1000 kg/m³ arasında olup

basınç dayanımı 2.5 ile 10 MPa arasındadır. Yüksek makrogözenek içeriğinden dolayı malzemenin ısı iletkenliği 0.15-0.20 W/(mK) arasındadır (Kosmatka et al. 2003).

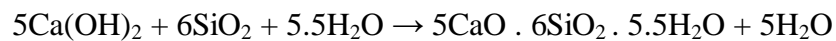
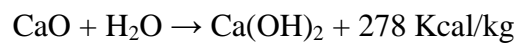
Sertleşmiş çimento hamuru veya harç içerisinde düşük yoğunluklu bir hücreli yapı oluşturmak için matris içinde sürüklenerek oluşturulmuş boşlukları içeren betonlar havalandırılmalı, hücreli, gaz, köpüklü ya da köpük beton olarak bilinirler (Newman and Owens 2003).

TS 453'e göre " Gazbeton, ince öğütülmüş silisli bir agrega ve inorganik bir bağlayıcı madde (kireç ve/veya çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturucu bir madde ilavesi ile hafifletilmesi ve buhar kuru ile sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli hafif betondur."

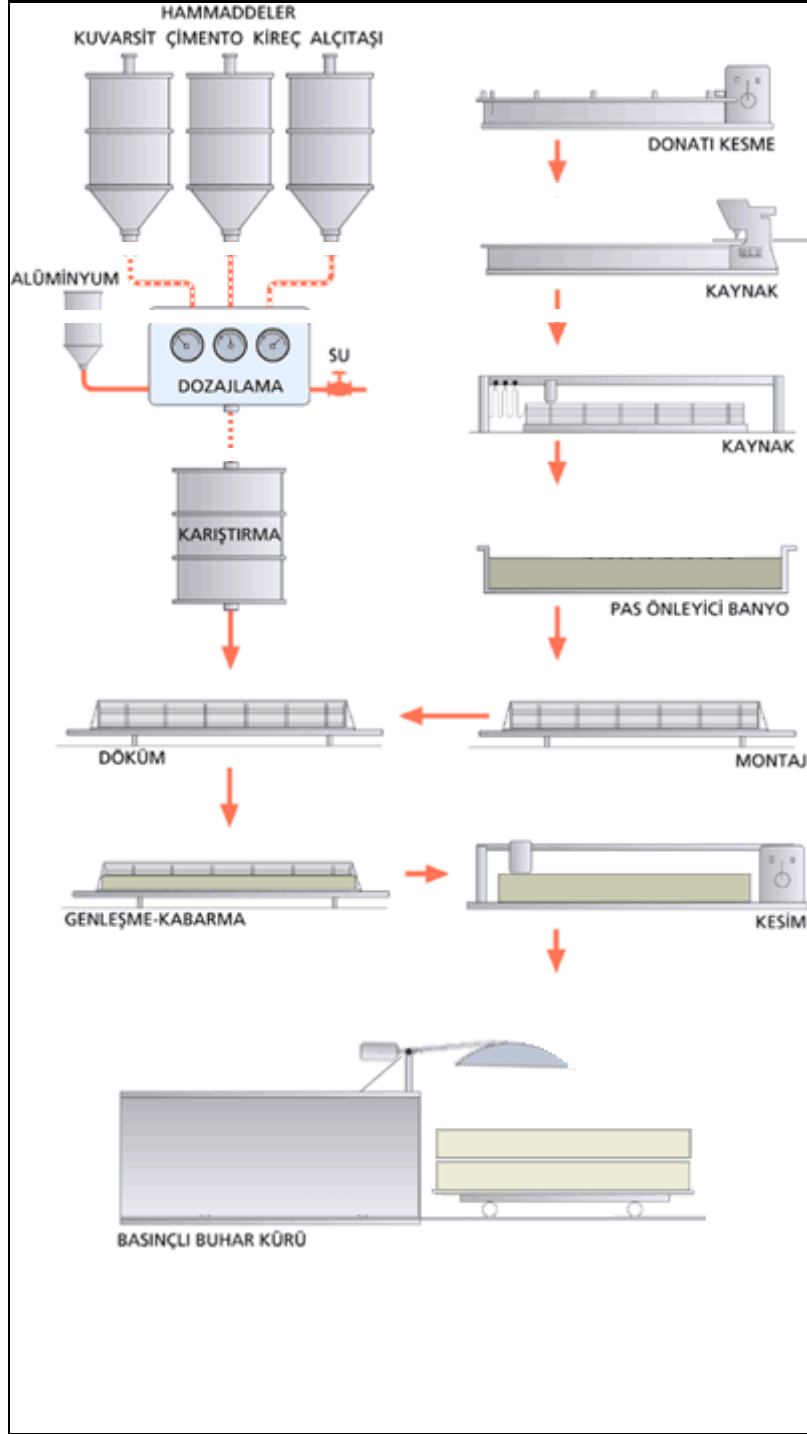
Gazbetonu oluşturan ana maddelerden biri olan kuvarsit, genel olarak kuvars kumu tanelerinin, silisten meydana gelmiş bir çimento ile birbirlerine çok sağlam şekilde bağlanmalarıyla oluşmuş bir kayaç olup, sedimanter ve metamorfik olmak üzere 2 çeşidi vardır. Kuvarsit, direnci yüksek, sağlam ve aşındırıcı bir kayaçtır ve öğütülmesi oldukça güç ve pahalıdır. Bu nedenle kuvarsit üretimi, aynı kimyasal bileşimde bulunan kuvars kumu ve kumtaşından (kuvarslı gre), ayrıca daha saf olan kuvarstan sonra tercih edilmektedir. Kuvarsitin kimyasal bileşimi, kuvars, kumtaşı ve kuvars kumu gibi SiO₂ olup, ancak içerisinde çeşitli miktarlarda feldspat, mika, kil, manyetit, hematit, granat, rutil, kireçtaşı vb. bulunabilir. (Çiçek, 2002).

2.2.2. Gabetonun Üretimi

Otoklavda kür edilmiş beton (gazbeton) genelde kuvarsça zengin kum, kireç, çimento ve gözenek oluşturucu alüminyum tozu kullanarak oluşturulur. Bu bileşenler su ile karıştırılır ve atmosferik basınç altında H₂ gazının açığa çıkması ile oluşturduğu gözenekli yapı kalıplanır, daha sonra otoklavda 200 °C 'de buhar basıncı altında belirli saat bekletilir (Kurama vd. 2009). Gazbetonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar özet olarak aşağıdaki gibidir (Çiçek 2002).



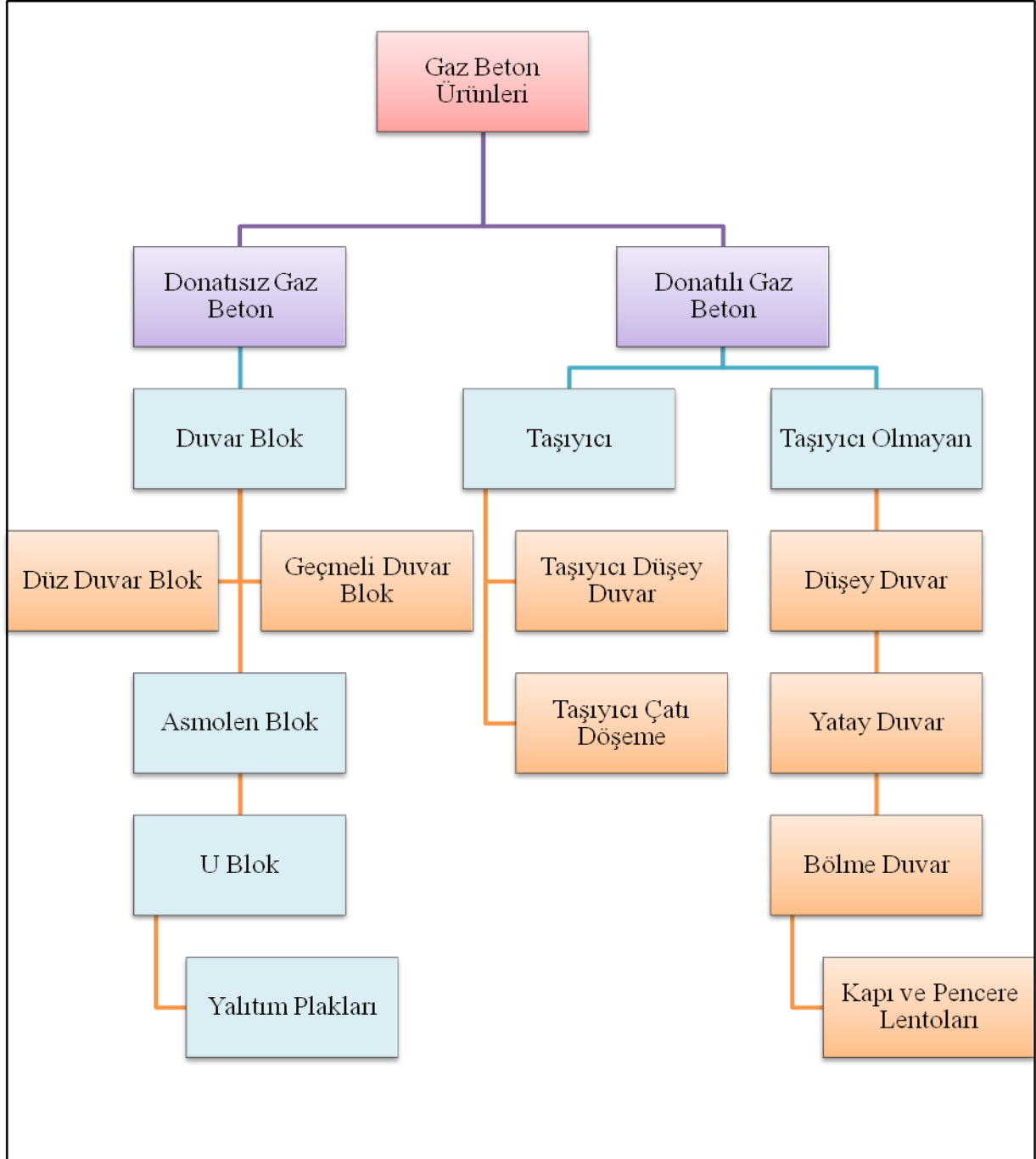
Yanmış kirecin su ile reaksiyona girmesi sonucu yüksek ısı açığa çıkar ve alüminyum tozu da reaksiyona girerek hidrojen açığa çıkarır. İnce toz taneleri halindeki alüminyum tozunun açığa çıkardığı bu gaz habbeleri (tanecikleri), gazbeton döküm hamurunun kabarmasına ve ana özelliği olan mikro gözenekli yapısına kavuşmasını sağlar. Malzemede oluşan kalsiyum hidrosilikat ve alüminyum hidrosilikat sonucunda sertleşme süreci başlar (Çiçek, 2002). Gazbetonun şematik olarak üretimi Şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3. Gazbeton üretim şeması (İnt. Kaynağı 2.)

2.2.3. Gazbetonun Sınıflandırılması

Gazbeton yapı bileşenleri üretilirken teçhizatlı olup olmadıklarına göre, yapı malzemesi ve yapı elemanı şeklinde iki grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.4). Bu gruplar şu şekilde sıralanır,



Şekil 2.4. Gazbetonun sınıflandırılması

Gazbeton birim hacim ağırlık ve basınç dayanımına göre ise 5 gruba ayrılmaktadır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.6'de verilmiştir.

Çizelge 2.6. Gazbetonun birim hacim ağırlık ve basınç dayanımına göre sınıflandırılması

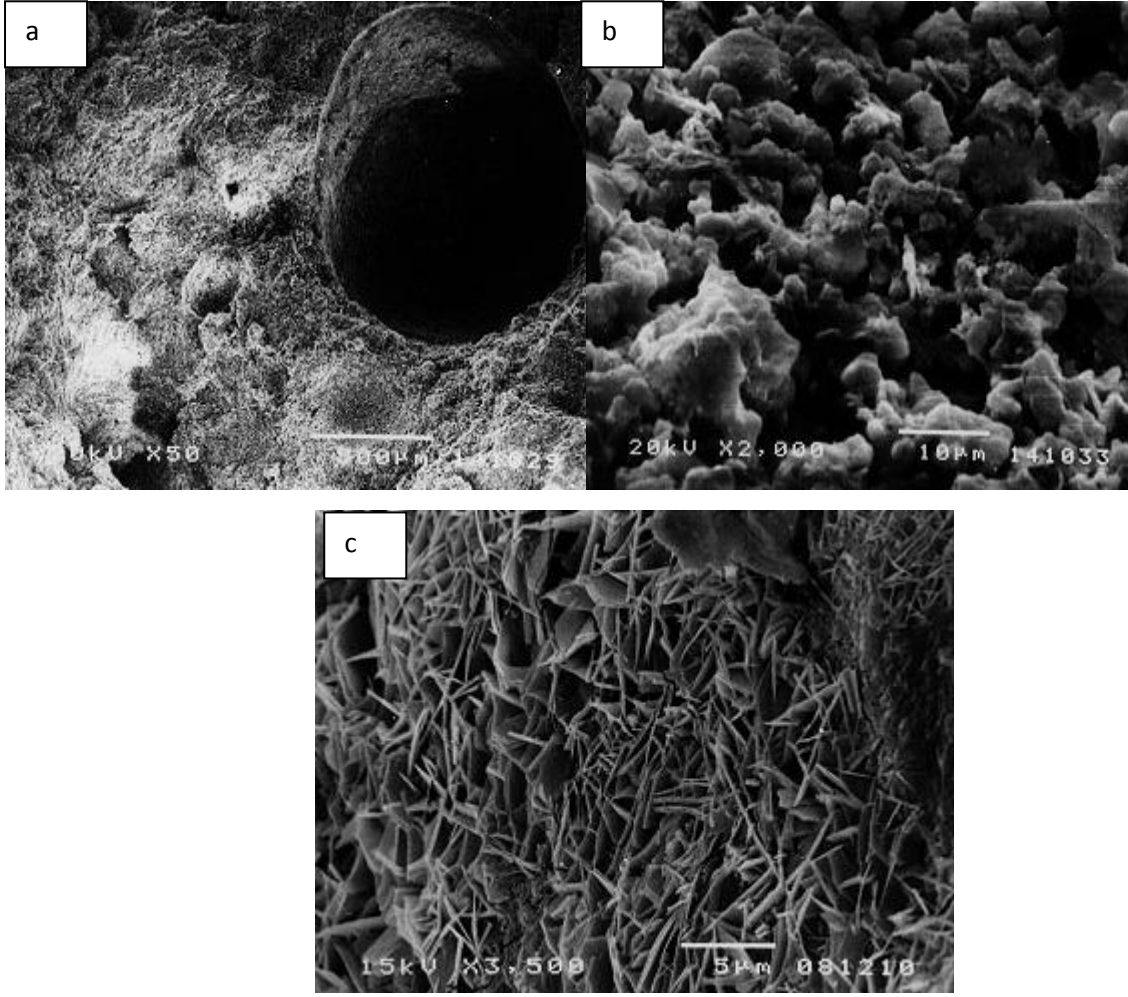
Sınıfı	Ortalama En Küçük Basınç Mukavemeti Değeri	En Küçük Basınç Mukavemet Değeri	Birim Hacim Ağırlıklar	Ortalama Birim Hacim Ağırlığı	Sınıf İşareti
	kgf/cm ² (N/mm ²)	kgf/cm ² (N/mm ²)	kg/dm ³	kg/dm ³	
G1	15 (1.5)	10 (1.0)	0.4	0.31 ile 0.40	G1 / 0.4
			0.5	0.41 ile 0.50	G1 / 0.5
G2	25 (2.5)	20 (2.0)	0.4	0.31 ile 0.40	G2 / 0.4
			0.5	0.41 ile 0.50	G2 / 0.5
G3	35 (3.5)	30 (3.0)	0.5	0.41 ile 0.50	G3 / 0.5
			0.6	0.51 ile 0.60	G3 / 0.6
G4	50 (5.0)	40 (4.0)	0.6	0.51 ile 0.60	G4 / 0.6
			0.7	0.61 ile 0.70	G4 / 0.7
G6	75 (7.5)	60 (6.0)	0.7	0.61 ile 0.70	G6 / 0.7
			0.8	0.71 ile 0.80	G6 / 0.8

2.2.4. Gazbetonun Fiziksel Özellikleri

2.2.4.1. Mikroyapı

Gazbetonda gözenek oluşturma metodu mikroyapıyı ve özelliklerini etkilemektedir. Gazbetonun malzeme yapısı katı mikropor matrisleri ve makroporlar olarak sınıflandırılmaktadır. Makroporlar kütlemin genişlemesi sebebiyle oluşmaktadır ve mikroporlar makroporlarla birlikte çeper olarak görünmektedir. Makroporlar çapları 60 µm den daha fazla olan gözenekler olarak öngörülmektedir.

Havalandırılmış betonun gözenek sistemi yapay hava gözenekleri, inter cluster gözenekler ve inter particle gözenekler olarak gözenek dağılım büyüklüklerine göre sınıflanmakta ve matris içinde gözeneklerin dağılımı gözenekğin özelliklerine bağlıdır (Narayanan and Ramamurthy 2000).



Şekil 2.5. (a),(b),(c) Gazbetonun mikroyapısı (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Diğer iyi kabul edilen bir yöntem ise gözenek çaplarının 50-500 μm arasında sınıflandırılmasıdır.

Havalandırılmış betonların porozitesi ve gözenek dağılımı, bileşimi ve kür metoduyla ilgilidir. Havalandırılmış betonların yüksek porozitesi makropor gözeneklerin hacminin artırılmasıyla sağlanabilir.

2.2.4.2. Yoğunluk

Su/çimento oranı esaslı malzemelerin havalandırma miktarı yoğunluğuyla ilişkilidir. Gözenek oluşturma yöntemi ne olursa olsun, gazbetonlar için puzolanlarla birlikte su/katı oranı su /çimento oranından daha önemli görünmektedir. Gaz beton için, daha az su katı oranı

yetersiz havalandırmaya yol açarken önemli bir sonuç bunun geçersiz sayılmasıdır. Fakat her iki durumda yoğunluk artmaktadır.

Gazbetonun bir çok fiziksel özelliği yoğunluğuna bağlıdır, bu özelliklerin sınıflandırılması yoğunluk esaslıdır. Gazbetonun yoğunluğu belirlenirken nem durumunun bilinmesi gereklidir. Malzeme otoklav' dan sonra kuru ağırlığından %15-25 oranında daha ağır olabilir. Bu değer çok düşük yoğunluklu gazbetonlarda %45'den fazla olabilir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

2.2.4.3. Kimyasal Özellikler

Gazbeton için, röntgen tozu kırınımı çalışmaları göstermiştir ki; ana tepkime ürünü kalsiyum silika hidrat (C-S-H) grubuna aittir. Tepkime ürünü bir arada bulunan kristaller karışımı, yarı-kristaller ve amorf tobermorittir. Hidrat fazda oluşan yalnızca kalsiyum silikadır.

Otoklavlardaki buhar sertleşmesi sonucu, malzemenin bünyesinde çeşitli kalsiyum hidrasilikatlar oluşur. En çok rastlanan 11 A⁰ Tobermorit (C₅S₆H₅) kristalidir. Seyrek olarak da Xonolit (C₆S₆H), Gyrolit (C₂S₃H₂), Hillebrandit (C₂SH) ve Afwillit (C₃S₂H₃) kristallerine rastlanır (Çiçek 2002).

2.2.5. Mekanik Özellikler

2.2.5.1. Basınç Dayanımı

Örnek boyutu ve şekli, gözenek oluşturma metodu, yükleme doğrultusu, yaşı, su içeriği, bileşenlerin özellikleri ve kür metodu gazbetonların dayanımını etkilemektedir. Gözeneklerin yapısı ve mekanik özellikleri basınç dayanımını etkilemektedir. Büyük makroporların oluşturulması basınç dayanımında önemli düşüşe neden olur. Genellikle basınç dayanımı ile yoğunluk doğrusal bir şekilde artar. Çizelge 2.7 'de literatürdeki farklı yoğunluklardaki basınç dayanım değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.7 Yoğunluk değeri – basınç dayanımı ilişkisi

Kuru Yoğunluk (kg/m³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (kN/mm²)	Termik Geçirgenlik (W/m°C)
400	1.3-2.8	0.18-1.17	0.07-0.11
500	2.0-4.4	1.24-1.84	0.08-0.13
600	2.8-6.3	1.76-2.64	0.11-0.17
700	3.9-8.5	2.42-3.58	0.13-0.21

Otoklav basınç dayanımını önemli şekilde arttırmaktadır ki tobermoritler yüksek sıcaklık ve basınç altında oluşmaktadır. Bu sebeple nihai dayanım otoklav içerisindeki basınca bağlı olarak gerçekleşmektedir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

2.2.6. Fonksiyonel Özellikler

2.2.6.1. Dayanıklılık

Gazbetonlar temelde tobermoritlerden oluşmaktadır. Ancak gazbetonlar yüksek poroziteye sahiptir. Bu malzeme iç yapısının zarar görmesine sebep olabilir. Sülfat ataklarının gerçekleşebileceği durumlarda bitümlü malzemeler kullanılarak dayanıklılık sağlanabilir. Karbonasyon gazbetonda yoğunluk artışına yol açabilir fakat çok büyük miktarda olmadığı sürece önemsiz sayılabilir.

2.2.6.2. Termal İletkenlik

Termal iletkenlik malzemenin yoğunluğuna, nem miktarına ve malzeme içeriğine bağlıdır. Isı iletkenlik büyük ölçüde yoğunluğun bir fonksiyonu olduğu için gazbetonun ısı iletkenliği için otoklav veya buhar kürü olmasının pek önemi yoktur. Gözeneklerin miktarı ve dağılımı ısı iletkenlik için çok önemlidir. Gözeneklerin inceliği daha iyi iletkenlik sağlar. Malzemenin nem miktarı da termal iletkenliği etkilemektedir.

2.2.6.3. Yangın Dayanımı

Gazbetonun yangın dayanımı normal betona göre daha iyi kabul edilmektedir. Gazbetonun yangın dayanımının yüksek olmasının nedeni kapalı gözenek yapısına sahip olmasının bir karşılığıdır. Bu gözenek yapısı ve düşük ısı iletkenliğe sahip olması gazbetonun yangın dayanımı yüksek bir malzeme olduğunu göstermektedir (Narayanan and Ramamurthy 2000).

Gazbeton 1000 °C civarında sinterleşmeye 1100-1200 °C arasında erimeye başlar. Malzeme bünyesinde 225 ile 450 °C arasında kılcal çatlaklar teşekkül etmektedir. Ancak bu çatlakların basınç mukavemetini etkilemediği gözlenmiştir. Basınç mukavemetinin 400 °C civarında bir zirveden geçtikten sonra 740 °C civarında başlangıç noktasına döndüğü görülmektedir. Bu noktadan sonra mukavemet düşmektedir. Bu noktanın gerçek sinterleşme başlangıcı olduğu anlaşılmaktadır. Benzer durum hacim değişimlerinde de görülmektedir. 300 °C sıcaklığa kadar az bir hacim değişmesi görülmekte, bu değer 740 °C sıcaklığa kadar sabit kalmakta, bundan sonra büyük değerlere ulaşmaktadır (Borhan 1984).

2.2.6.4. Akustik Özellikler

Akustik özellikler de termal iletkenlik ve yangın dayanımı gibi kapalı gözenek yapısından etkilenmektedir.

2.3. Literatür Özetleri

Karakurt vd. (2010) doğal zeoliti gazbetonda agrega ve gözenek oluşturucu malzeme olarak kullanmışlardır. Kırılmış ve öğütülmüş örnekleri gazbeton karışımında kullanmadan önce iki farklı boyutta sınıflandırmışlardır. Kuvarsit ile %25, %50, %75 ve %100 oranlarında değiştirilen malzemelerin etkisi ve kür süresinin gazbeton üzerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Buldukları sonuçlarda özellikle kaba boyutlardaki doğal zeolitin kullanımının gazbetonun fiziksel ve mekaniksel özelliklerini faydalı biçimde etkilediğini belirtmektedirler. Optimum yer değiştirme miktarını %50 olarak bulmuş ve bu orandaki gazbeton örneklerinde basınç dayanımını 3.25 MPa, birim ağırlığı 0.553 kg/dm³ ve ısı iletkenliği 0.1913W/mK olarak ölçmüşlerdir. SEM analizlerini %50 oranındaki zeolit katkılı gazbeton örnekleri üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yoğun C-S-H yapılarını %50 miktarında yer değiştirilen

örnekler üzerinde bulmuşlardır. Sonuç olarak kalsine zeolitin gazbeton üretiminde hem agrega hem de gözenek oluşturuçu olarak kullanılabilirdiğini ve basınç dayanımı 4.6 MPa ve birim ağırlığı 0.930 kg/dm³ olan gazbetonların alüminyum tozu olmaksızın üretilebileceğini belirtmektedirler.

Kurama vd. (2009) Tunçbilek Termal Güç Santralinden elde edilen atık taban külünün gaz beton üretiminde agrega olarak kullanılabilirliğini incelemiştirlerdir. Atık taban külünü değişik oranlarda yer değiştirerek agrega olarak kullanılmışlardır. Değişik oranlarda katılan taban küllü örneklerin üretiminden sonra kimyasal, mekaniksel, fiziksel ve mikroyapı analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlarda tüm gazbeton örneklerinde birim ağırlıkların düştüğünü görmüşler ancak %25 ve %50 oranlarında yer değiştirilen serilerde dayanımda faydalı sonuçlar almışlardır. Isı iletkenlik değerlerinin ise atık taban külünün yükseltilmesine paralel olarak azaldığını belirtmektedirler.

Mostafa (2005) Kireç ve kumu gazbetonda hava ile soğutulmuş cüruf ile yer değiştirmiştir. Basınç dayanımını örneklere farklı zaman aralıklarında 8 barlık basınç uygulanarak; (2,6,12 ve 24 saat aralığı) ölçmüştür. Hidratasyon reaksiyonunu sönmemiş kireç ile su arasında takip etmiş hidratasyon ürünleri XRD ve SEM/EDX analizlerini kullanarak araştırmıştır. %50 oranında cürufun kum ve kireç ile yer değiştirmesinin basınç dayanımını arttırdığını belirtmektedir, özellikle de kısa kür zamanlarında (2 ve 6 saat). Optimum dayanımın; %50 cüruf ile düşük kireç (%10 CaO) ve %30 cüruf ile yüksek kireç (%25 CaO) karışımlarında elde edildiğini belirtmektedir. Yüksek kireçli karışımlarda cüruf içeriğinin %30'a çıkarıldığında kalsiyum yönünden zengin lifli CSH fazları görmüştür. Düşük kireçli karışımlarda silisyum yönünden zengin CSH fazları etrafında kuvars parçacıkları bulunduğunu belirtmektedir.

Wongkeo and Chaipanich (2010) atık taban külü ve silis dumanından yapılmış otoklav ve hava kürüne tabi tutulmuş düşük yoğunluklu gazbetonların basınç dayanımı, mikroyapısı ve termal iletkenliklerini araştırmışlardır. Sonuçlara göre atık taban külden üretilen numunelerde 6 saatlik otoklav kürüne tabi tutulanlar ile 28 gün havada kür edilen numunelerin basınç dayanımları benzer çıktığını ancak karışıma silis dumanı katıldığı zaman basınç dayanımında daha yüksek sonuçlar elde edildiğini belirtmektedirler. En yüksek basınç dayanımı atık taban külünün %20 ve silis dumanın %5 oranında kullanıldığı karışımlarda elde edilmişler ki bu dayanım değerinin portland çimento kullanılan karışım serisinden de daha

yüksek olduğunu belirtmektedirler. 28 gün hava kürü ve 6 saat otoklav kürü uygulanan tüm numunelerin termal iletkenliklerinin portland çimentolu kontrol numunelerinden daha yüksek olduğunu belirtmektedirler. Hava kürüne tabi tutulan numunelerde hidrasyon ürünlerini; etrenjit, CSH, ve gehlenite hidrat olarak termogravimetrik analizler sonucu belirlemişlerdir. Atık taban külü ve silis dumanı katkılı otoklav kürü edilen numunelerde, kontrol karışımındaki lifli C-S-H fazından daha yoğun tobermorit fazı bulmuşlardır.

Albayrak vd. (2007) zeolitin gazbetonun özellikleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Zeoliti gazbeton karışımlarında kuvars ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Zeolit katkılı gazbeton örneklerin bulk yoğunluklarını $270-500 \text{ kg/m}^3$ olacak şekilde hazırlamışlardır. Örnekleri X ışınları kırınımı, X ışınları yansımaları ve termal analiz kullanarak analiz etmişlerdir. Bulk yoğunluk, basınç dayanımı, ve termal iletkenlik parametrelerini araştırmışlardır. Araştırmanın sonuçlarına göre, ticari gazbeton esas olarak tobermorit, kuvars ve anhidrit fazlarından oluştuğunu, fakat zeolit katkılı örneklerde, tobermorit ve kuvarın yanında reaktif olmayan anhidrit ve klinoptilolite fazlarını bulmuşlardır. Zeolit katkılı XRD örnekleri, $700-1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki işlemlerinden sonra wollastonite, gehlenite, ve orthoclase fazları gözlenmiştir. Zeolit katkılı gazbeton örneklerinin termal iletkenliklerinde düşüş olduğunu belirlemişlerdir ($0.08-0.12 \text{ kcal/m h }^\circ\text{C}$). Basınç dayanım değerlerinin $1.22-3.34 \text{ N/mm}^2$ arasında olduğunu belirtmektedirler.

Holt and Raivio (2005) atıkların gazlaştırılmasından üretilen iki ince taneli atığın gazbeton için uygunluğunu araştırmışlardır. Düşük birim ağırlık sağlamak sebebiyle, gazbetonda genellikle küçük gaz parçacıkları oluşturan alüminyum tozu ile atık malzemelerin birlikte kullanıldığını belirtmektedirler. Metalik gazlaştırma atıklarının hem yüksek miktarda olduğunu hem de bunların bu çalışma için uygun olduğunu belirtmektedirler. Çalışmalarında, atık ilavesinin hava kabarcığı oluşumu için ekstra alüminyum tozu ihtiyacını ortadan kaldırıp kaldıramayacağına karar verme üzerine odaklanmışlardır. Aynı zamanda atıkları bazı agregalar ile yer değiştirmiş ve enerji korunumu sağlamışlardır. İlk laboratuvar çalışmalarında beton karışımının hangi tipte ve ne kadar atığa ihtiyaç duyacağı belirlemişlerdir. Çoklu özellikleri; %10 atık ilaveli, alüminyum tozlu ve tozsuz gazbeton üzerinde test etmişlerdir. Laboratuvar araştırmalarından sonra, tüm testleri Siporex AAC fabrikasında, Finlandiya'da gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerin, atıkların nihai ürünlere bir zararı olmadan ekonomik gazbeton üretimi için umut verici bir kaynak olduğunu belirtmektedirler.

Çelik (2005) çalışmasında uçucu külün gazbeton üretiminde kullanılabilirliğini araştırmıştır. Gazbeton üretiminde kullanılan çimentonun; %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında eksilterek, yerine uçucu kül ikame ederek katkılı ve katkısız gazbeton numuneleri üretmiştir. Ürettiği bu numuneler üzerinde SEM analizleri, fiziksel ve mekaniksel deneyler gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak uçucu külün, %15 uçucu kül katkı oranına kadar G2 sınıfı gazbeton üretiminde, %30 uçucu kül katkı oranına kadar da G1 sınıfı gazbeton üretiminde kullanılabileceğini belirtmektedir.

Andolsun (2006), Türkiye’de üretilmekte olan gazbeton malzemesinin, komşu sıvalarının ve gazbeton yapıştırıcısının temel, mekaniksel, fiziksel, bileşim ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmasında; biri dolgu, G2, diğeri taşıyıcı, G4, iki çeşit gazbeton bloğu, gazbeton yapıştırıcısı ve birbiri ardına uygulanan çimento esaslı dış sıvaları laboratuvar analizleriyle incelemiştir. Bulguları gazbetonun malzeme özellikleri açısından değerlendirmiş; gazbeton ve bütünleyici duvar elemanlarının birbirleriyle ve onarım amaçlı kullanımlarında, Anadolu’daki tarihi ahşap karkas yapılarla uyumluluk açısından yorumlamıştır. Sonuç olarak gazbeton yapı malzemesinin tarihi yapıların onarımında dolgu malzemesi olarak kullanımının yalnızca özgün dolgu malzemenin kaybedildiği durumlarda kullanılabileceğini belirtmiştir. Onarım için gazbetonun tarihi dokuyla bütünlüğünün geliştirilmesinin gerekliliğini belirtmektedir. Bu amaçla da gazbetonun kireç esaslı onarım harçlarıyla iyi bağlanabilmesi için puzolanik aktivitesinin geliştirilmesinin ve/veya tarihi doku ile gazbeton arasında kullanılacak yeni bir onarım harcının üretilmesini önermektedir.

Hauser et al. (1999) selüloz endüstrisinden elde edilen uçucu külün yüksek miktarda kireç ve sülfat içermesinden dolayı bu malzemenin gazbeton üretimi için ikinci dereceden önemli hammadde olduğunu belirtmektedirler. Laboratuvar çalışmalarında geleneksel gazbeton karışımında bulunan kireci uçucu kül ile yer değiştirmişlerdir. Ürettikleri numuneleri referans serilerle karşılaştırmışlar ve en yüksek basınç dayanımını 0.7-0.8 arasındaki C/S hacim oranlarındaki kireç-sülfat, kül serileriyle elde etmişlerdir. Bu sonuçla külün bu tipinin ticari kireç yerine kullanılmasının onaylandığını belirtmektedirler. Al-bearing külü ile yaptıkları gazbeton serilerinde ise basınç dayanımını belirgin oranda düşük bulmuşlar ve külün bu tipinin pratikte uygulamaya uygun olmadığını belirtmektedirler.

Kus and Carlsson (2003) gazbetonun dayanıklılığını ve uzun süreli performansının daha iyi anlayabilmek için, doğal ve suni şekilde havalandırılan ve bu uygulamaya tabi tutulmayan

gazbeton numunelerinin mikroyapılarının değişimini özellikle de kimyasal etkilerle oluşan değişimleri araştırmışlardır. Karbonatlaşma süreci doğal ve yapay havalandırılmış gazbeton numuneleri üzerinde spektrografik ve mikroskopik analizler ile çalışılmıştır. Kimyasal ve yapısal analizleri X ışınları kırınımı (XRD) ve enerji dağıtıcı spektroskopi (EDS) ile gerçekleştirmişlerdir. Doğal bir şekilde havalandırılan numuneleri 130x130x150 mm ebatlarında üretmişler ve 6, 18, 36 ay süre ile İsveç'in doğal iklim şartlarına maruz bırakmışlardır. Yapay olarak havalandırılan numuneleri 65x150x90 mm ebatlarında üretmişler ve ışık ile su spreyine maruz bırakmışlardır. Yapay olarak havalandırdıkları örneklerle 102 dakika ışık ve 18 dakika su spreyi uygulamışlar ve ölçümleri 500, 1000, 1500 ve 2500. saatlerde almışlardır. Sonuç olarak hem doğal hem de yapay olarak havalandırılmış örneklerin mineralojik değişiklikler bakımından benzer özellikler gösterdiklerini, suni havalandırma yaptıkları numunelerde daha fazla fiziksel bozunma gözlemlediklerini belirtmektedirler.

Matsushita et al. (2004) karbonatlaşma derecesi ile rötire arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu amaçla laboratuvar koşullarında %3 ve %0.3'lük CO₂ miktarlarıyla karbonatlaştırılmış örnekler üretmişlerdir. Karbonatlaşma derecesi %20'den az olan oranlarda rötire gözlemlenmişler %20-%50 arasındaki oranlarda rötire gözlemlenmişler ve bu değer yaklaşık %0.1 olduğunu belirtmektedirler. Karbonatlaşma derecesini %50 ile %60 arasında tuttuklarında rötire değerini bu sefer yaklaşık %0.25 olarak gözlemlenmişlerdir. %25 'den daha az oranlarda karbonatlaşma olmamasının sebebini bu derecedeki silikat anyon yapılarının iki kez korunmasına ve iç yüzeydeki Ca iyonlarının yerini protonların alması olarak açıklamaktadırlar.

Önal vd (2007) gazbetonun döküm sürecinde meydana gelen kabarmanın, donatı aderansı ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında Ø6'lık düz donatı gazbeton döşeme paneli kullanmışlardır. Gazbetonun kabarma yönüne göre alt, orta ve üst kısımlardan numuneler alarak aderans ve basınç testlerine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak gazbetonun alt kısmına göre, orta ve üst kısımlarının daha düşük aderans ve basınç dayanımı gösterdiğini belirtmektedirler.

Özgenç ve Sarısözen (1999) gazbeton üretiminde kullanılan ana hammaddelerden biri olan kuvars yerine perlit kullanımını araştırmışlardır. Kuvars sabit tutulmak ve diğer bileşenlerin miktarları değiştirilmemek üzere, öğütülmüş kuvars ve ham perlitli belirli oranlarda

kariştirarak oluşturdukları deneme dökümleri üzerinde basınç dayanımı ve rötre deneylerini gerçekteşirmiş ve fiziksel özellikleri belirlemişlerdir. Deneylerinde G2/04 sınıfı gazbeton reçetesi ve Menderes bölgesi ham perlitlerini kullanmışlardır. Sonuçlarına göre bu reçetedeki gazbeton sınıfı için ham perlit oranının %30 olduğunu belirtmektedirler.

Pehlivanlı (2009) gazbetonun ısı iletkenlik değeri nin nem içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak değişimini deneysel olarak araştırmıştır. G2/04 sınıfı gazbeton numunelerinin, 0.0% ile 48% arasında değişen beş farklı kütle sel nem içeriği için 0 °C ile 45 °C arasındaki sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayı ların değişimini deneysel olarak incelemiştir. Sonuç olarak ısı iletkenliğin kütle sel nem içeriğine ve sıcaklığa bağlı olarak arttığını belirtmektedir.

Aksoy (2008) Elazığ'daki (TS 825-3.Bölge) sandviç ve gazbeton duvar uygulamalarının, ortalama ısı geçirgenlik katsayısı (U_{ort}) ve ısı kaybını (Q) araştırmıştır. Mevcut durum ve yönetmelikteki uygulamaların ortalama U -değerleri ve ısı kaybını hesaplamış ve karşılaştırılmalarını yapmıştır. Mevcut durumu, gazbeton duvar uygulamalarında $U_{ort}=0.99$ ve $1.21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve sandviç duvar uygulamalarında ise $U_{ort}=0.94-1.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplamıştır. 3. bölge için istenen $U=0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ göre detaylandırılan, duvar uygulamalarında ısı kayıplarının yaklaşık % 35-55 azaldığını belirtmektedir.

Kömürlü ve Önel (2007) gazbeton yapı ürünlerinin toplu konut uygulamalarında kullanımı sırasında uyulması gereken tasarım ve uygulama kurallarının belirlenmesine ve açıklanmasına çalışmışlar ve gazbeton yapı ürünlerinin toplu konutların tasarım, uygulama ve kullanım aşamalarında sağladığı yararları belirtmektedirler.

Ünverdi (2006) gazbeton kırıklarının geri dönüşümünün sağlanabilmesi için 400 dozlu silindir ve küp beton numuneleri üretmiş numuneleri yüksek sıcaklık fırınlarında bekletmiştir. Küp ve silindir numunelerde, %0, %25, %50 ve %75 oranında gazbeton kırığını kırmataş 2 yerine kullanarak seriler üretmiş ve serileri oda sıcaklığı, 300 °C, 600 °C ve 900 °C'lik sıcaklıklara tabi tutarak, hasarlı ve hasarsız deneyler yapmış ve deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak gazbeton atığının betonda agrega olarak belirli oranda kullanılmasının, yüksek sıcaklığın beton üzerindeki olumsuz etkilerini azalttığını belirtmektedir.

Trunk et al. (1999) üç farklı gazbeton örneği üzerinde genleşme yönünün lineer olmayan kırılma mekaniği parametreleri üzerine etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Her bir gazbeton örneğini bağ alanının genleşme doğrultusuna paralel ya da dik olacak şekilde hazırlamışlardır. Kırılma enerjisinin ve çekme gerilmesinin iki yönde de farklı olduğunu bulmuşlardır. Sonuç olarak her üç gazbeton türünün genleşme çizgisinin bağ alanına paralel olduğu durumlarda daha az gevrek davranış gösterdiğini belirtmektedirler.

Matsushita et al. (2000) gazbetonun karbonasyon derecesini araştırmışlardır. Gazbetonun karbonasyon derecesini $D_c (\%) = (C - C_o) / (C_{max} - C_o) \times 100$ formülü ile belirlemişlerdir burada C, C_o ve C_{max} 'ın gazbeton örneklerinde ki karbondioksit miktarlarını göstermekte olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca 600 °C ve 800 °C' deki TG-DTA analizlerindeki ısı kayıplarında belirledikleri karbondioksit miktarlarıyla da gazbetonun karbonasyon derecesinin hakkında karar verilebileceğini belirtmektedirler. Sonuç olarak kendi önerdikleri bu metot ile gazbetonun karbonasyonlaşma derecesinin diğer metotlardan daha doğru şekilde araştırılabileceğinin mümkün olduğunu belirtmektedirler.

Karaaslan (2009) gazbeton malzemesinin, yürürlükteki Türk standartlarına göre ısı aktarım özelliklerinin ölçüm prosedürünü araştırmıştır. Çalışmasında belirli yoğunluktaki gazbeton numunesinden çıkarılacak ısı iletkenlik deneyinin gerçekleştirileceği en küçük deney parçası kalınlığını standart yönergelerine uygun olarak araştırmıştır.

Topçu vd (2005), hem yalıtım açısından hem de hafif beton elde ederek bina ağırlığını azaltmak amacıyla, ortaya çıkan gazbeton kırıklarının (GKA) beton üretiminde agrega olarak değerlendirilmesi araştırmışlardır. Çalışmada 4-16, 16-32 mm tane boyutundaki kırmataşlar ve bu iki farklı kırmataş yerine % 0, % 50 ve % 100 oranlarında GKA kullanarak betonlar üretmişlerdir. Üretilen beton numuneleri üzerinde mekanik, fiziksel özellik deneyleri yapmışlar yeterli dayanım ve dayanıklılığa sahip betonların üretilip üretilmeyeceğini araştırmışlardır. GKA kullanılması ile beton dayanımlarında ve birim ağırlıklarında düşme gözlemlenmiştir.

Narayanan and Ramamurthy (2000), araştırmalarında gazbetonun fiziksel (mikroyapı, yoğunluk), kimyasal, mekaniksel (basınç ve eğilme dayanımı, elastisite modülü, rötre) ve fonksiyonel (ısı yalıtımı, nem geçirimi, yangın dayanımı ve ses yalıtımı) özelliklerinin sınıflandırılmasını araştırmışlardır.

Laukaitis et al. (2009), çeşitli lif katkılarının gazbetonun özellikleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Lif katkılarının gazbeton harcının plastik dayanımını arttırdığını, akışkanlığını ve kabarmasını etkilediğini belirtmektedirler. Lif katkısının gazbetonun basınç ve eğilme dayanımını arttırdığını söylemektedirler.

Mousa and Uddin (2009), hibrid fiber-takviyeli polimer (FRP) gazbeton panellerin yapısal davranışlarını araştırmışlardır. FRP laminatlarının daha yüksek sertlikte gazbeton panelleri üretiminde kullanılabileceğini söylemektedirler. Bunu başarmak için panel üretimi gerçekleştirmiş ve testlere tabi tutmuşlardır. Deney sonuçlarına göre FRP laminatlarının gazbeton panellerinin hem dayanımını hem de duktilitesini önemli derecede etkilediğini söylemektedirler.

Tanaçan vd (2009), yüksek sıcaklıkların ve çeşitli soğuma rejimlerinin gazbeton üzerine etkisini araştırmışlardır. Hava soğutmalı malzemeleri oda sıcaklıklarında ve yangın sonrası sıcaklıklarda test etmişlerdir. Su ile söndürmenin etkisini söndürme sonrasındaki ıslak durumda ve oda sıcaklığındaki kuru koşullarda gerçekleştirdikleri testlerle belirlemişlerdir. Sonuç olarak söndürme etkisinin göz ardı edilmesi durumunda yaklaşık 700-800 °C sıcaklığın gazbetonun dayanımı üzerine bir etkisinin olmadığını belirtmektedirler. Ancak 800 °C'den sonraki sıcaklıklar için daha fazla yangın güvenliğinin alınmasını söylemektedirler.

Grutzeck et al. (2004), uçucu kül tabanlı gazbeton formülasyonunu sodyum hidroksit (NaOH) ile destekleyerek saha sert ve darbelere daha az eğilim gösterecek gazbeton örnekleri üretmeyi amaçlamışlardır. Otoklav kürü süresince tobermorit matriksi içerisindeki zeolit kristal yapısının gelişimini gerçekleştirmek için yeterli alkali girişini sağlamışlardır. Karışımların zaman ve sıcaklıkla olan ilişkisini incelemişlerdir.

Ramamurthy and Narayanan (2000), otoklav kürü yapılmış ve yapılmamış gazbeton örneklerinin kuruma büzölmeleri üzerine kompozisyonların etkisini araştırmışlardır. Çimento-kireç oranının ve uçucu kül içeriğinin artırılması ile kuruma büzölmesinin arttığını gözlemlemişlerdir. Otoklav kürü sayesinde kuruma büzölmesinde önemli oranda azalma elde etmişlerdir. Hidratasyon ürünlerinin fiziksel yapılarının kuruma büzölmesine büyük oranda etki ettiğini düşünmektedirler.

Laukaitis and Fiks (2006), çalışmalarında gazbetonun akustik kalitesini araştırmışlardır. Gazbetonun akustik kalitesinin geçirgenlik ve porozitesine göre değiştiğini belirtmektedirler. Akustik girişimölçer ile ölçümler yapmışlardır. Çeşitli gazbeton tipleri ile yaptıkları deneylere göre, hava geçirgenliğinin fonksiyonu şeklinde ses absorbsiyon katsayısı regresyon denklemlerini bulmuşlardır.

3. MATERYAL ve METOD

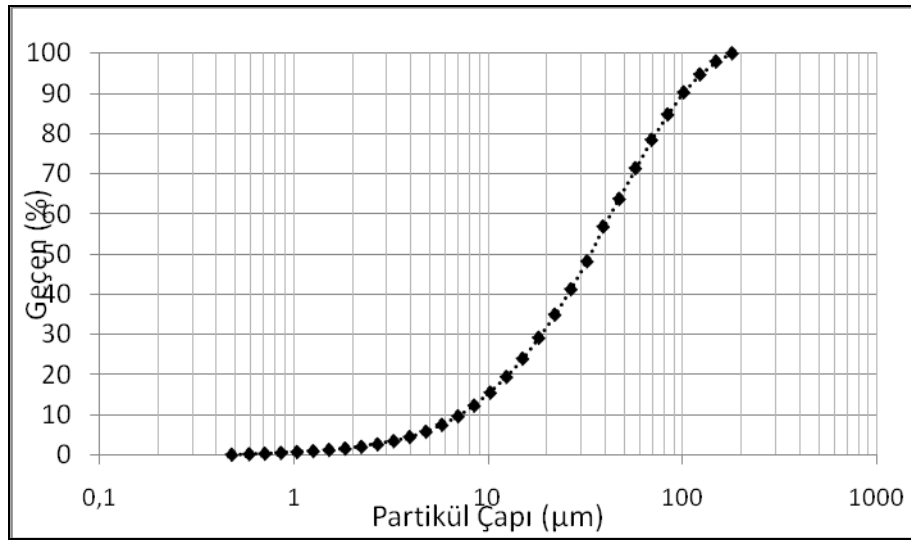
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Uçucu Kül

3.1.1.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

Çalışmada, Kütahya Seyitömer Termik Santrali'ne ait uçucu kül kullanılmıştır. Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silisli uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının %25'in üzerinde (%39.01) olması nedeniyle, TS EN 197-1'de V sınıfı uçucu kül için istenilen koşullara tamamen uymaktadır (Türker vd. 2009).

Uçucu külün kimyasal analizi XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Uçucu külden bulunan toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı toplam 76,50 olarak elde edilmiştir. Uçucu külün bileşiminde gazbeton üretiminde zararlı olabilecek oranda bileşiğe rastlanmamıştır.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan uçucu külün lazer tane boyutu analiz grafiği

Çalışmada kullanılan uçucu külün tane boyutu lazer tane boyutu analiz cihazı (particle size analyser) ile belirlenmiştir (Şekil 3.1). Buna göre uçucu külün d_{50} değeri: 33 µm, dir. Uçucu külün %90'nı 100 µm'nin altındadır.

Uçucu külün Blain incelik ve özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2.1 g/cm^3 ve $2564 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak elde edilmiştir.

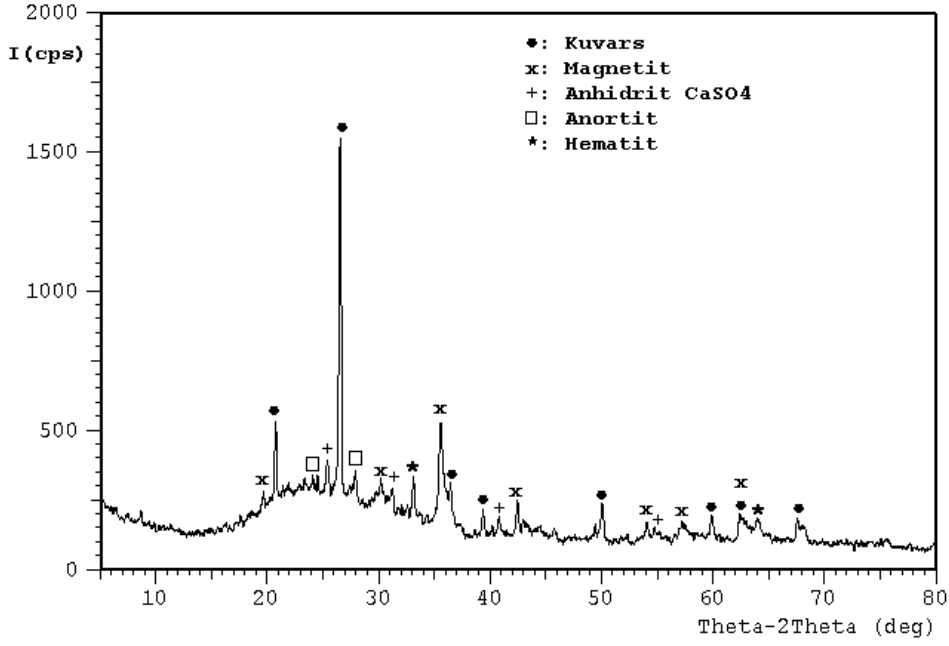
Çizelge 3.1. Uçucu külün kimyasal yapısı

Oksit	% Miktarı
SiO ₂	46,30
Al ₂ O ₃	19,20
Na ₂ O	0,51
Fe ₂ O ₃	11,00
CaO	6,34
MgO	4,76
P ₂ O ₅	0,10
SO ₃	1,54
K ₂ O	2,45
MnO	0,11
TiO ₂	0,87
NiO	0,22
Cr ₂ O ₃	0,12
F	0,11
A.Z.	3,26

3.1.1.2. Mineralojik Analiz Sonuçları

Seyitömer Termik Santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 3.2’de verilmiştir.

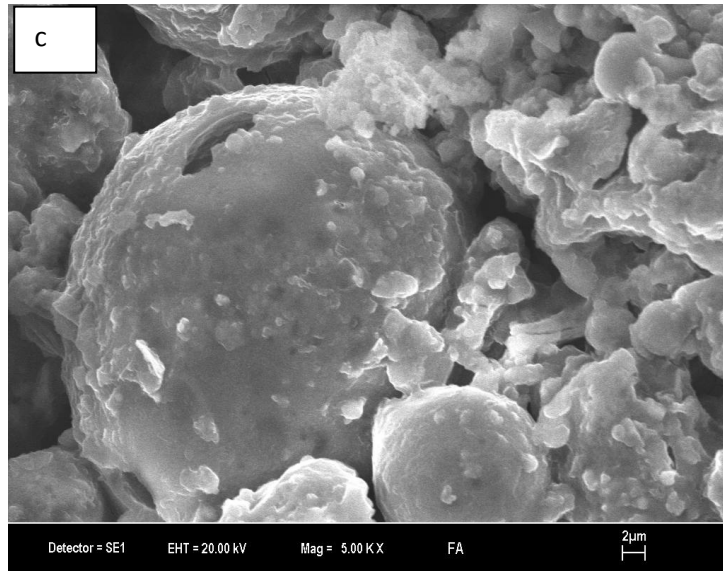
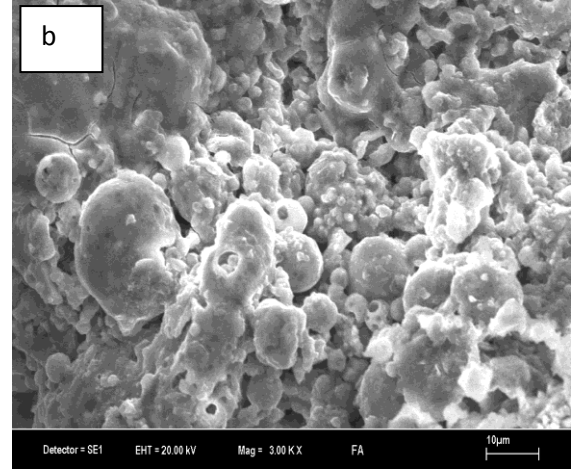
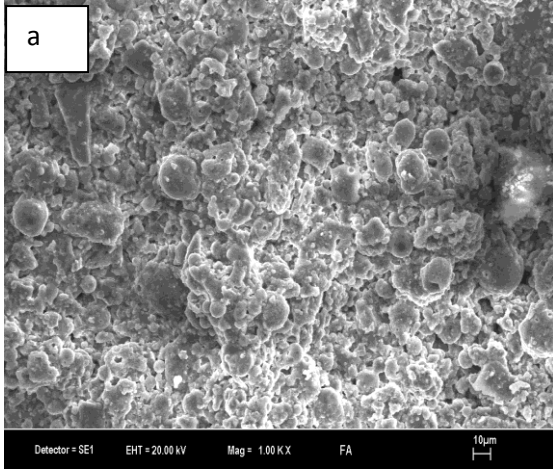
Buna göre başta camı faz olmak üzere, kuvars, mullit, hematit ve ferrit spinel grubundan manyetit, magnezyoferrit gibi kristalize fazlar içermektedir.



Şekil 3.2. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı

3.1.1.3. Morfolojik Analiz Sonuçları

Uçucu külün tane morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Toz haldeki malzemenin inceleme güclüğü nedeniyle, uçucu kül az miktarda seyreltik cam suyu ile birlikte preslenmiştir. SEM incelemesi için yüzeyde iletkenliğin sağlanması amacıyla numuneler karbon ile kaplanmıştır. SEM analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi (AKÜ) Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (TUAM) yapılmıştır. SEM incelemesi için LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. XRD analizleri ise Shimadzu 6000 model XRD cihazı (Cu K α) ile yapılmıştır. SEM ile yapılan incelemeler sonucunda uçucu kül içerisindeki silika küreciklerinin boyutlarının 1 ile 15 μm arasında değiştiği gözlenmiştir (Şekil 3.3). Küreciklerin şekillerinin çoğunun düzenli olduğu, bazı kürelerin ise kristalizasyon şartlarına bağlı olarak küresellikten uzaklaştığı ve gözenek içerdiği gözlenmiştir.



Şekil 3.3. (a),(b),(c) Uçucu külün morfolojik yapısı

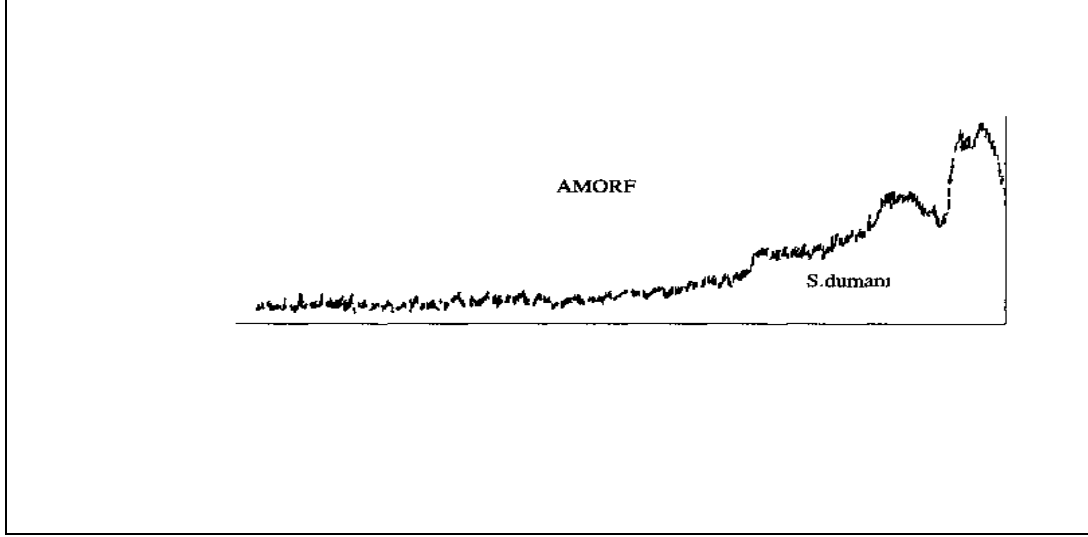
3.1.2. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı Antalya Etibank Elektrometalurji Fabrikası'ndan temin edilmiştir. Silisyum metali ile %75 ferrosilisyum alaşımları veya bunların karışımlarından elde edilen silis dumanlarının bileşimlerinde SiO_2 miktarı %85'i geçmemekte, genellikle %90 civarında olmaktadır (Yeğinoğlu 2009). Bazı tipik ortalama değerler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Silis dumanı kimyasal bileşimi (Yeğınobalı 2009)

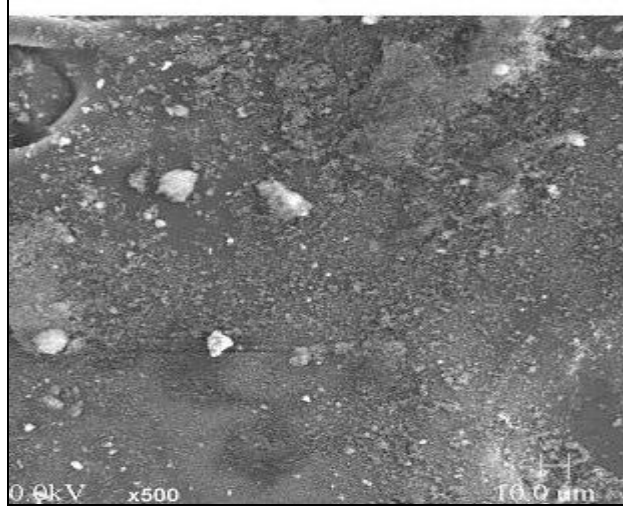
Alaşım Türü				
	Si	Fe-Si (%75)	Fe-Si (%75)	SiFeCr
SiO ₂	93.65	93.22	94.50	70-85
Al ₂ O ₃	0.28	0.31	0.88	2-5
FeO ₃	0.58	1.12	0.70	1-2.5
CaO	0.27	0.44	0.80	1-2
MgO	0.25	1.08	1.25	4-8
Na ₂ O	0.02	0.10	-	-
K ₂ O	0.49	1.37	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	1-4
S	0.20	0.22	0.23	0.5-1.3
C	3.62	1.92	0.90	1-1.5
Kızdırma Kaybı	4.36	3.10	0.75	1-3.5
45µm elekte kalan (%)	5.4	1.8	-	-
Özgöl yüzey BET (m ² /kg)	20.000	17.200	-	-
Puzolanik Aktivite				
- Çimento ile (%)	102	96.5	-	-
- Kireç ile (MPa)	8.9	-	-	-
Su gereksinimi (%)	138.8	139.2	-	-
Gevşek hacim ağırlığı (kg/m ³)	-	-	330	150-250

Silis dumanlarında asitte çözünen klor miktarı ağırlıkça %0.016-0.025 arasında değişmektedir. X-ışınları difraktogramında silis dumanlarının tamamı ile amorf yapıya sahip oldukları görünmektedir.



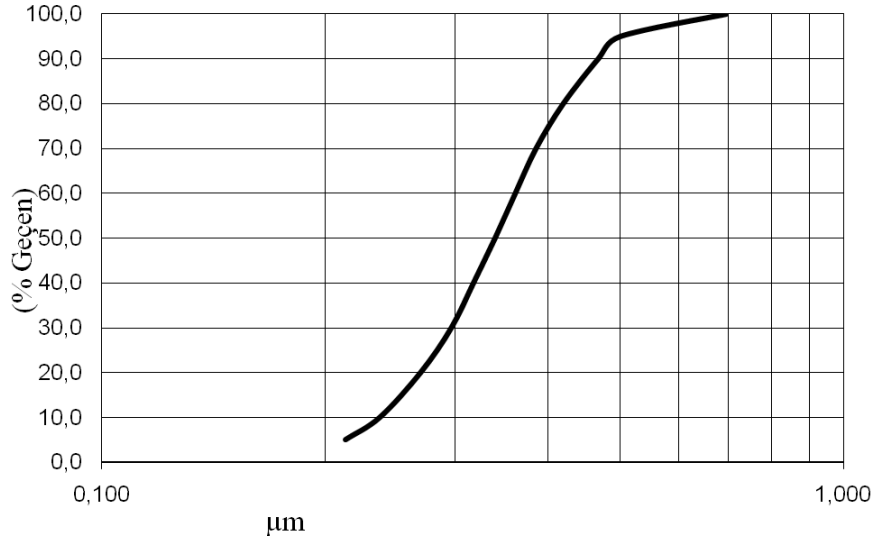
Şekil 3.4. Silis dumanının mineralojik yapısını gösteren X-ışınları difraktogramı (Kılınçkale 1996).

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyle küresel taneciklerden meydana gelir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir.



Şekil 3.5. Silis dumanı SEM görüntüsü (Çelik vd. 2004)

Silis dumanının tane boyut dağılımına ait grafik Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tanelerin hemen tümü $1\mu\text{m}$ 'den küçük olup ortalama tane boyu $0.1\mu\text{m}$ civarındadır.



Şekil 3.6. Silis dumanı tane boyutu dağılımı

3.1.3. Kireç

Çalışmada kullanılan kireç sönmemiş kireç olup Afyonkarahisar ADAÇAL Kireç Fabrikasından temin edilmiş olup, yapılan özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı deneyleri sonucunda özgül ağırlığı 3.02 gr/cm^3 ve özgül yüzey alanı da $5224 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olarak bulunmuştur. Kirecin kimyasal bileşimi Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Kirecin kimyasal bileşimi

Bileşen	%
CaO	98,77
Al ₂ O ₃	0,04
Fe ₂ O ₃	0,04
SiO ₂	0,06
MgO	0,28
K ₂ O	0,34
SrO	0,04
SO ₃	0,43

3.1.4. Çimento

Çalışmada CEM I 42,5 R tipi Portland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. CEM I 42,5 R tipi Portland kompoze çimentosu özellikleri

Analiz Grubu	DENEY		Sonuç	Sınır Değer
Kimyasal Özellikler	SO ₃ (%)		2.91	<3.5
	MgO (%)		2.33	<5
	A.Z. (%)		1.92	<4
	Cl (%)		0.06	<0.1
	Çözünmeyen kalıntı (%)		0.67	<1.5
Fiziksel Özellikler	Kıvamlilik suyu (%)		30	
	Özgül yüzey (cm ² /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 ³)		3.07	
	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	2 gün	26.5	>20
7 gün		38.7	>31.5	

3.1.5. Alçı

Çalışmada kullanılan alçı Antalya YTONG Gazbeton Fabrikası'ndan hazır olarak temin edilmiştir. Yapılan özgül ağırlık ve özgül yüzey alanı deneyleri sonucunda malzeme özgül ağırlığı 2.21 gr/cm³ ve özgül yüzey alanı 5404 cm²/gr bulunmuştur.

3.1.6. Alüminyum tozu

Alüminyum tozu Antalya Ytong Fabrikası tarafından temin edilmiştir

3.2. Numunelerin Üretimi ve Deney Yöntemleri

Çalışmada uçucu kül, silis dumanı, çimento, kireç, alçı ve alüminyum tozu kullanılarak farklı oranlarda bileşenlere sahip numuneler üretilmiştir. Silis dumanı çimentoya yaklaşık %3, %6, %9 ve %12 oranlarında ikame edilerek katılmıştır. Karışımlar üzerine kür etkisinin

araştırılması amacıyla tüm seriler üç kez üretilmiştir. Karışımlara ait malzeme bileşenleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Karışım oranları

Karışım Oranları							
Malzeme Seri Adı	Uçucu Kül (gr)	Çimento (gr)	Silis Dumanı (gr)	Kireç (gr)	Alçı (gr)	Al. Tozu (gr)	Su (gr)
K	1500	800	-	300	300	1	2000
S1	1500	775	25	300	300	1	2000
S2	1500	750	50	300	300	1	2000
S3	1500	725	75	300	300	1	2050
S4	1500	700	100	300	300	1	2150

Karışımlar üretilirken öncelikle uçucu kül, çimento, silis dumanı ve alçı homojen biçimde kuru karışıma tabi tutulmuşlardır. Karışım homojen hale geldikten sonra su eklenerek mikser yardımıyla malzemeler tekrar karıştırılmıştır. Karışımın kıvamı hazır duruma geldikten sonra, kireç ve alüminyum tozu karışıma ilave edilerek 30-45 saniye arası mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Daha sonra karışım, daha önceden hazır hale getirilmiş olan 10cm kenarlı küp numuneler içerisine numune yüksekliğinin 2/3’ünü dolduracak seviyede yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştirilen numuneler, içerisi önceden 75⁰C’ye ayarlanmış etüv içerisinde 24 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkarılan numuneler otoklav ve buhar kürüne tabi tutulmuşlardır.



Resim 3.1. Numunelerin etüvde bekletilmesi

Buhar kürü etkisini araştırmak için numuneler 80 °C'ye ayarlı kür havuzunda 8 saat süreyle serbest buhar kürüne tabi tutulmuşlardır.



Resim 3.2. Numunelerin buhar kürüne tabi tutulması

Kür etkisini araştırmak için uygulanan diğer proses ise numunelerin 42 bar basınç kapasiteli otoklavda 156 °C ve 177 °C sıcaklıklarda 8 saat süreyle 4 bar ve 8 bar buhar basıncı altında kür edilmesidir.



Resim 3.3. Otoklav

Otoklav ve buhar k r nden çıkarılan tüm numuneler kurumaları için 24 saat 105  C sıcaklıkta etüvde bekletilerek uygulanacak fiziksel ve mekanik testlere hazır hale getirilmiŐlerdir.



Resim 3.4. Numunelerin etüvde bekletilmesi

Üretilen numunelerin önce birim hacim ağırlıkları ve ultrases geçiş hızları belirlenmiştir. Daha sonra numuneler 20 ton kapasiteli tek eksenli basınç presinde dayanımlarının belirlenebilmesi için basınç testine tabi tutulmuşlardır.



Resim 3.5. Numunelerin ultrases geçiş hızlarının ölçülmesi



Resim 3.6. Tek eksenli basınç presi

3.2.1. Birim Hacim Ağırlık

Numunelerin birim hacim ağırlıkları formül 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır.

$$\Delta = \frac{W}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.1)$$

Δ : Birim Hacim Ağırlık (kg/m³)

W : Etüv Kuru ağırlığı (kg)

V : Numunenin Hacmi (m³)

3.2.2. Ultrases Geçiş Hızı

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir. Ultrasonik test cihazı, ses üstü dalgaların, dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasındaki bir mesafeyi ne kadar zamanda geçtiğini mikrosaniye birimiyle otomatik olarak belirlemekte ve cihazın üzerindeki ekranda göstermektedir (Erdoğan 2003). Ses üstü dalga hızının geçiş süresi makine üzerinde okunduktan sonra aşağıdaki bağlantı (3.2) yardımıyla dalga hızı hesap edilmektedir.

$$V = \frac{L}{t} \quad (3.2)$$

V = Ses üstü dalga hızı (km/sn)

L = Problar arası mesafe (m)

t = Zaman (μ s)

3.2.3. Basınç Dayanımı Testi

Numunelerin basınç dayanımları aşağıda belirtilen formül (3.3) yardımıyla belirlenmiştir.

$$f_b = \frac{P_k}{A_o} \quad (3.3)$$

f_b = Basınç dayanımı (MPa)

A_0 = Yüzey alanı (mm²)

P_k = Kırılma anındaki yük (N)

3.2.4. Isı İletim Katsayısı Hesabı

Deney numunelerinin ısı iletim katsayılarının ölçülmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan "Shotherm QTM-D2" ısı iletkenlik cihazıyla 1,7x5x10 cm boyutlarında dikdörtgen prizma şeklinde kesilmiş gazbeton numuneler üzerinde yapılmış ve ısı iletim katsayısı aşağıdaki denklem (3.4) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$k = F \frac{Q \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1} - H \quad (3.4)$$

k: Isı İletim Katsayısı (W/mK)

F, H: Ölçme cihazına ait sabitler

Q: Isıtıcı tele verilen ısı akısı

t1, t2: Ölçüm zamanları (saniye)

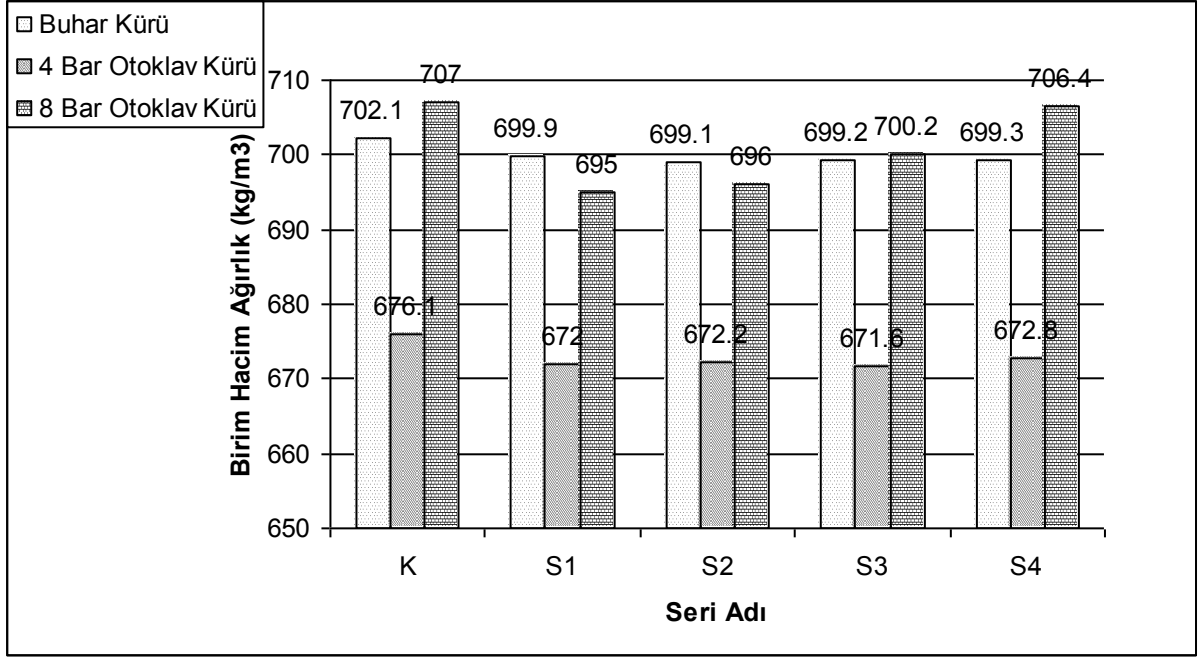
T1: t1 zamanındaki sıcaklık

T2: t2 zamanındaki sıcaklık

4. BULGULAR

4.1. Birim Hacim Ağırlık Bulguları

Farklı kür şartları uygulanan karışımlara ait birim hacim ağırlık grafiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

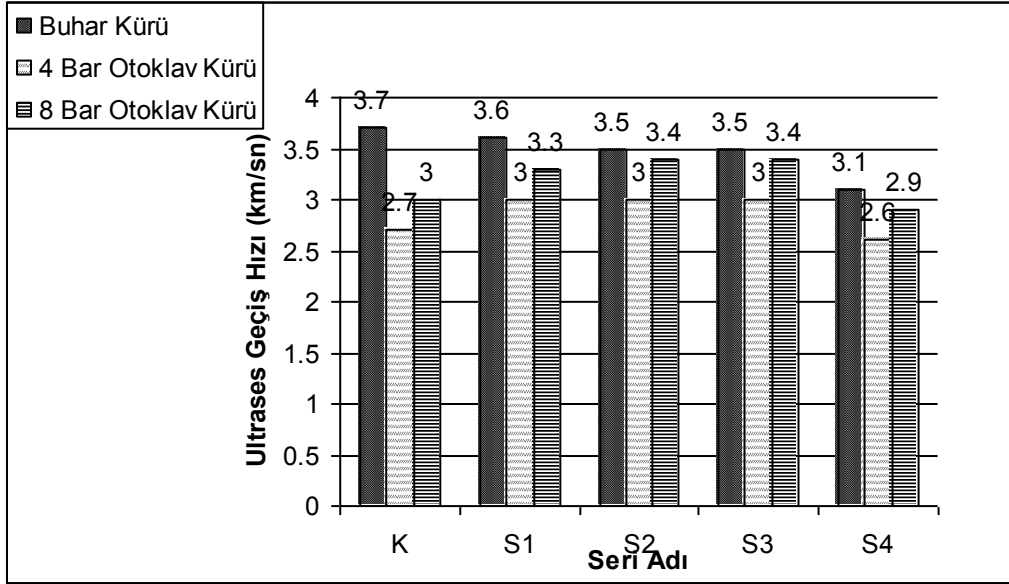


Şekil 4.1. Serilere ait birim hacim ağırlık değerleri

Çimento miktarına yapılan silis dumanı ikameleri sonucunda birim hacim ağırlık değerlerinde azalma gözlenmektedir. Buhar kürü ve 8 bar otoklav kürü uygulanan serilerin birim hacim ağırlıkları hemen hemen birbirine yakın gözükürken 4 bar otoklav kürü uygulanan serilerin birim hacim ağırlıkları diğer kür şartlarına göre daha düşük gözükmektedir. Bu değerler ticari gazbeton ürünlerin birim hacim ağırlık değerlerine benzerlik göstermektedir. 4 bar otoklav küründe amorf halde bulunan jel yapısının 8 bar otoklav küründe daha yüksek sıcaklıkta çözünerek kristal faza geçmesi ve bu sebeple numunelerin daha yoğun bir yapıya kavuştuğu düşünülmektedir.

4.2. Ultrases Geçiş Hızı Bulguları

Karışımlara ait ultrases geçiş hızları Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

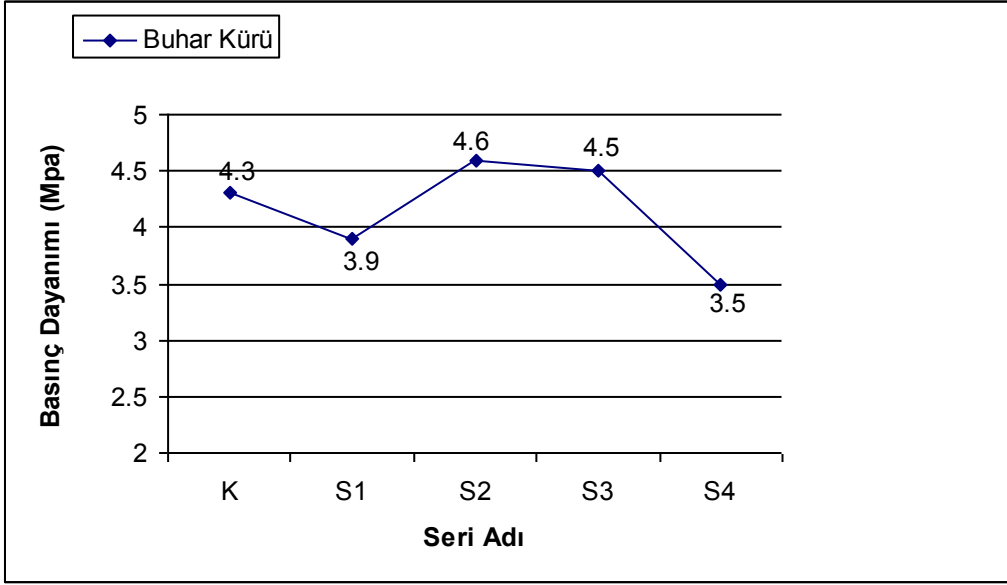


Şekil 4.2. Serilere ait ultrases geçiş hızı değerleri

En yüksek geçiş hızı buhar kürü uygulanan serilerde gözlenirken, otoklav kürü uygulanan serilerde bu değer azalmaktadır. Bunun en önemli sebebi, alüminyum tozunun oluşturduğu kapalı boşluklar çimento hidrasyon ürünleri tarafından tamamen çevrilerek içerisine su almaması ve bu sayede porozif yapısının arttırılmış olmasıdır. Diğer yandan çimento ürünlerinin de otoklav kürü sonrasında hidrate olarak serbest suyu harcamakta ve yeni C-S-H fazları oluşarak numune içerisindeki serbest boşlukların dolması sağlanmaktadır. Yeni hidrate ürünlerin oluşmasıyla ultrases geçiş hızında artış beklense de, alüminyum tozunun etkisiyle oluşan boşluklar, bu hidrate ürünlerin içerisinde homojen bir şekilde dağılarak kapalı poroz bir yapı oluştururlar. Ses dalgalarının her zaman dolu yapıdan daha rahat geçmelerinden dolayı buhar kürü uygulanan serilerin daha fazla geçiş hızına sahip oldukları görülmektedir.

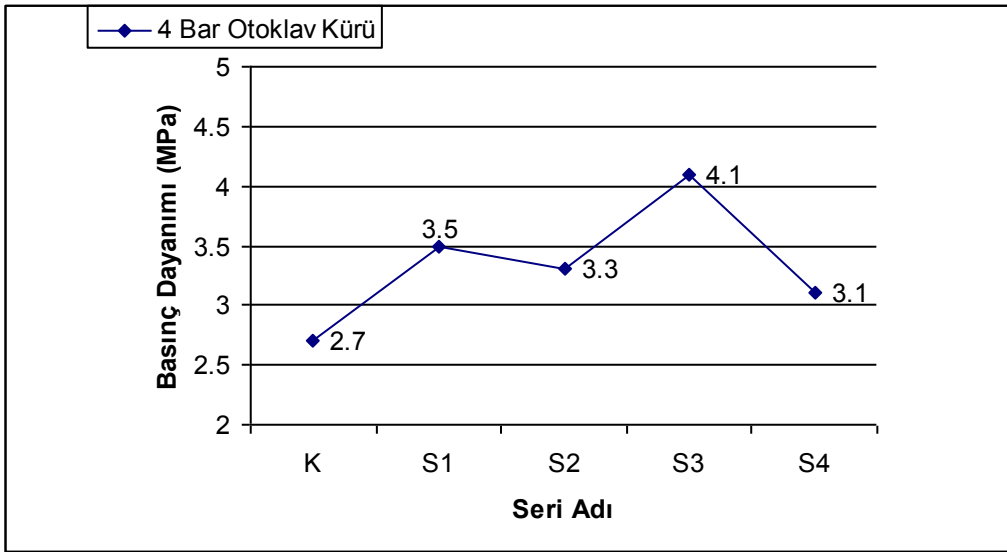
4.3. Basınç Dayanımı Bulguları

Karışımlara ait basınç dayanımı değerleri kür şartlarına göre Şekil 4.3.-4.5’de gösterilmektedir.



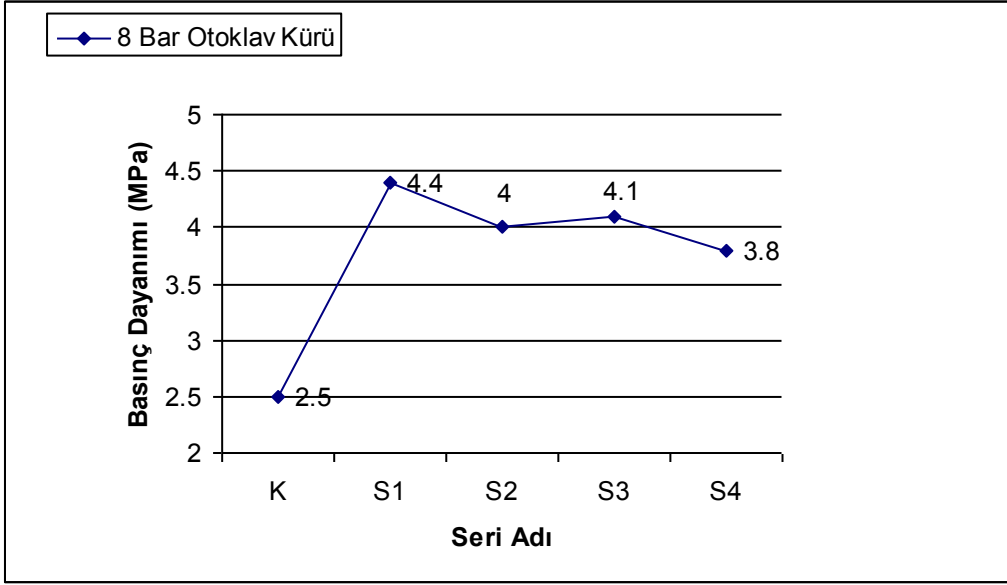
Şekil 4.3. Buhar kürü uygulanan serilere ait basınç dayanımı grafiği

Buhar kürü uygulanan serilerde K serisine göre S2 ve S3 serilerinde daha yüksek dayanımlar elde edilmiş S1 ve S4 serilerinde ise dayanımda düşüş gözlenmiştir.



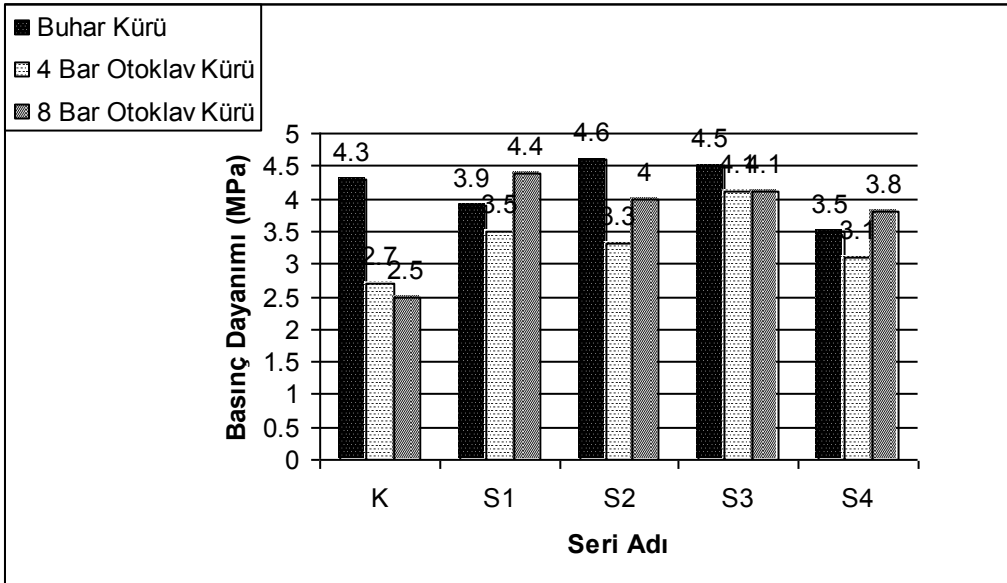
Şekil 4.4. 4 Bar otoklav kürü uygulanan serilere ait basınç dayanımı grafiği

4 bar otoklav kürü uygulanan serilerde basınç dayanımlarında K serisine diğer serilerde daha yüksek basınç dayanımı değerleri gözlenmektedir ancak S4 serisindeki artış diğer serilere göre daha az olmakta fakat sonuç olarak K serisinden daha yüksektir.



Şekil 4.5. 8 Bar otoklav kürü uygulanan serilere ait basınç dayanımı grafiği

8 bar otoklav kürü uygulanan serilerde K serisine oranla basınç dayanımında daha yüksek değerler gözlenmekte olup en yüksek dayanım değeri S1 serisinde gözlenmektedir.

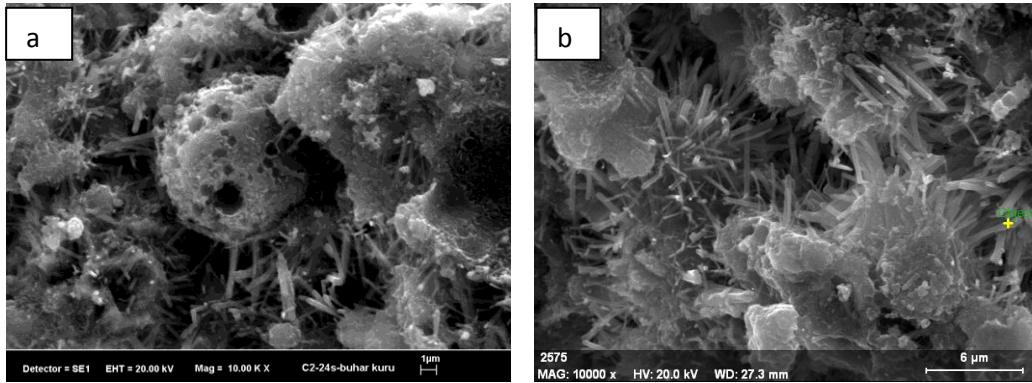


Şekil 4.6. Kür şartlarına göre karşılaştırmalı basınç dayanımı grafiği

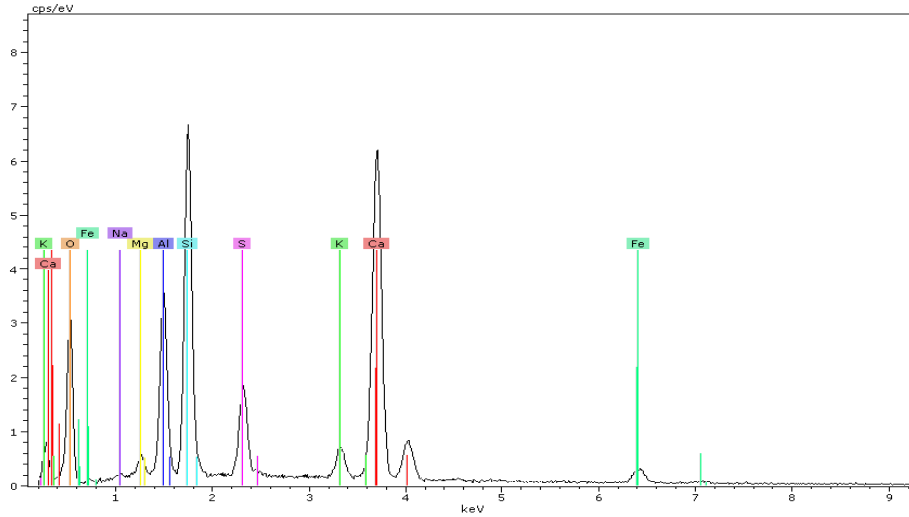
Bilindiği gibi çimento içerisinde başlıca trikalsiyum silikat; $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S), dikalsiyum silikat; $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S), trikalsiyum alüminat; $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) ve tetrakalsiyum alümino ferrit; $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) mineral fazları bulunmaktadır. Sülfat içerikli bileşikler ve çimentodaki C_3A fazının aşağıdaki reaksiyonu sonucu etringit fazı oluşur.



Şekil 4.7’de buhar kürü sonrasındaki içyapı gösterilmiştir. Uçucu kül tanelerinin hidrasyon reaksiyonlarına katılmaya başladıkları ancak yapı içerisinde önemli ölçüde etringit fazının oluştuğu gözlenmiştir. İğnesel kristaller üzerinden yapılan EDX analizleri sonucunda Ca, Si, Al elementlerinin varlığı ile birlikte S elementinin varlığı gözlenen yapının etringit olduğu sonucunu getirmiştir. Çimento fazının hidrasyonuna bağlı C-S-H jel yapısı gözlenmiş ancak kristal tobermorit varlığına rastlanmamıştır.



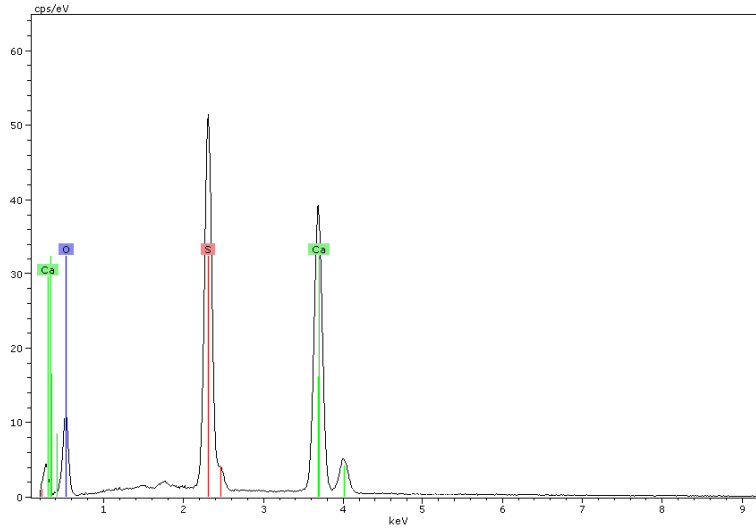
Şekil 4.7. (a),(b) Buhar kürü uygulanan serilerde etringit oluşumu



Şekil 4.8. Buhar kürü sonrası iç yapı EDX analizi

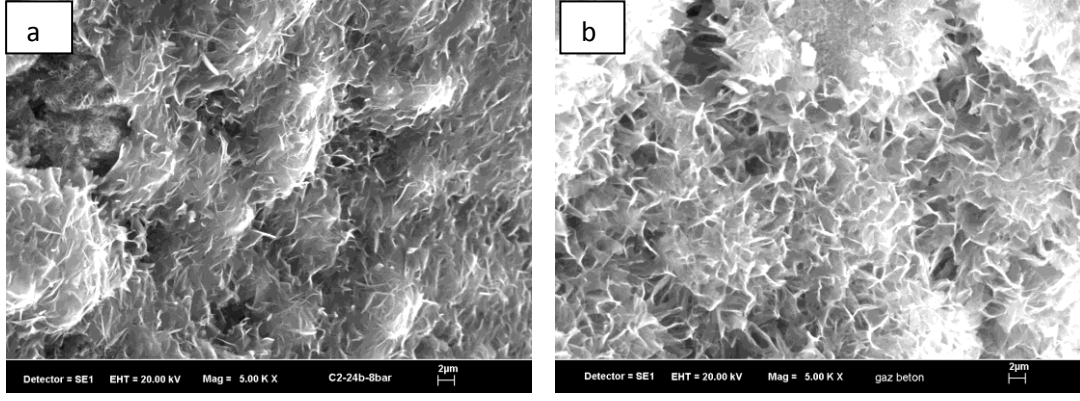
Buhar kürü sonrasında ölçülen mukavemet değerlerinin 4,5MPa gibi yüksek değerler olduğu gözlenmiştir. Etringit fazı oluşumunun erken hidrasyon döneminde mukavemet sağladığı göz önüne alındığında bu beklenen bir sonuçtur. Ancak ileri hidrasyon döneminde (Otoklav şartları) etringit fazının otoklav şartları altında çözünerek yeni C-S-H fazlarına dönüşmesi

yapı içerisinde yoğunluk değişimine bağlı hacim değişiklikleri ve dolayısıyla mikro çatlaklar yaratmaktadır. Bu mikro çatlakların özellikle sülfatça zengin alçı kristallerine yakın olmaları dikkat çekici bulunmuştur.



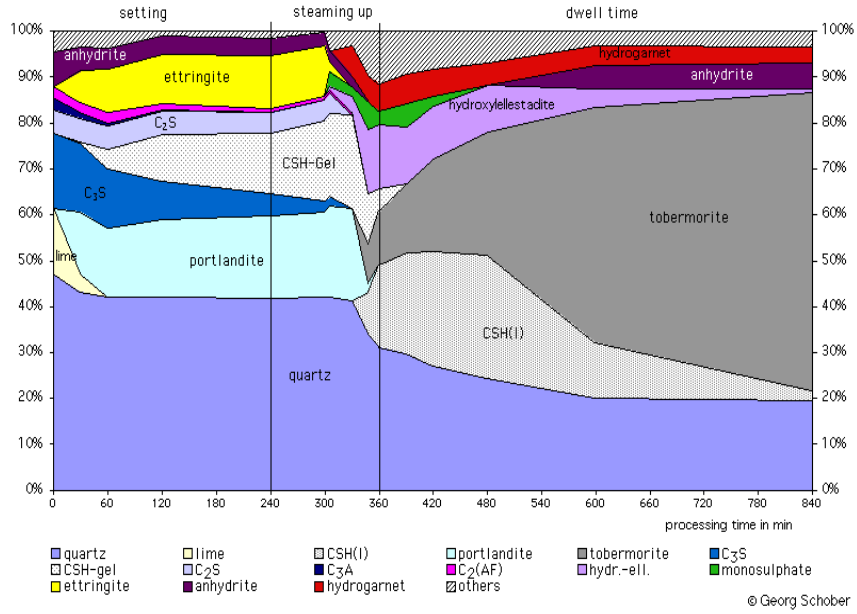
Şekil 4.9. Otoklav kürü sonrasında alçı kristalleri etrafında oluşan mikro çatlaklar ve EDX analizi

Otoklavda kürlenen numunelerde tobermorit plakaları gözlenmesine rağmen mukavemet değerlerindeki düşüklük beklenmeyen bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.10'da da görüleceği gibi çimento-uçucu kül-kireç bileşenleri ile üretilen gaz beton numunelerdeki tobermorit yapısı ile, çimento-silika kumu-kireç bileşenleri ile üretilen ticari gaz beton örneğindeki tobermorit yapısı birbirinden farklıdır.



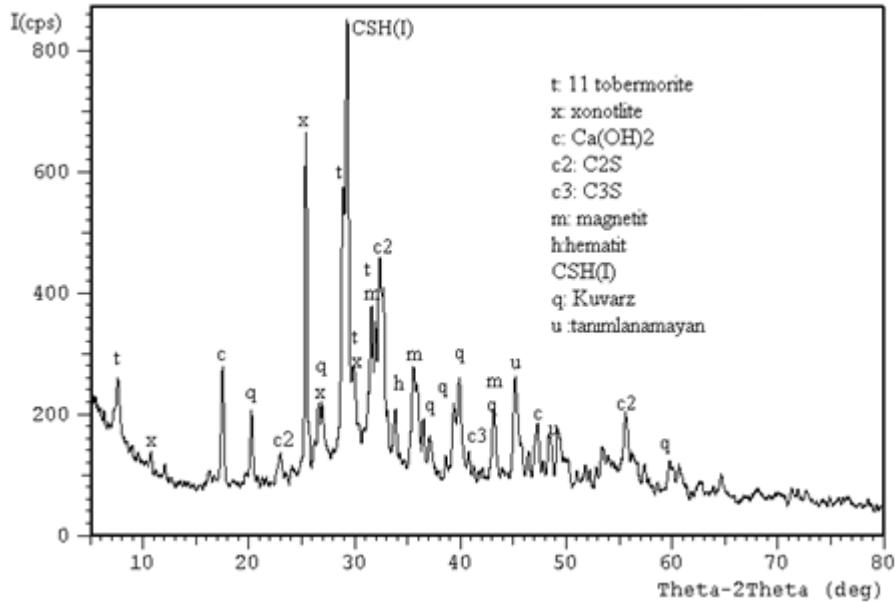
Şekil 4.10. Farklı otoklav şartları altında iç yapı gelişimleri (a: 8 bar otoklav, b: ticari gaz beton)

Çimento-silika kumu-kireç bileşenleri ile üretilen ticari gaz betonlarında gözlenen kristal C-S H fazı “Normal tobermorit” olarak adlandırılmıştır. Çimento-uçucu kül-kireç bileşenleri ile üretilen gaz beton numunelerdeki tobermorit yapısı “ Anomal (Anomalous) tobermorit” olarak adlandırılır. Bunun nedeni uçucu külden gelen alüminyum, kükürt ve alkalilerin tobermorit kristal kafesine girmesindedir. Normal tobermorit yapısı yüksek sıcaklıktan (kür şartları altında oluşan) etkilenmez ve tobermorit plakaları arasındaki su kaybedilmez. Bu nedenle küçülme göstermez. Anomal tobermorit ise yüksek sıcaklıkta plakaları arasındaki suyu kaybetme eğilimindedir. Bu nedenle yüksek sıcaklıkta ve uzun kür süreleri büyük oranda küçülmeye ve buna bağlı gelişen gerilimler neticesinde mukavemet azalmalarına neden olur. Sonuç olarak, hidrasyon şartlarında yapılan iyileştirmeler sonucunda neden mukavemet değerlerinde azalma gözlemlendiği buradan oluşan farklı tipteki tobermorit morfolojileri ile açıklanabilmektedir.

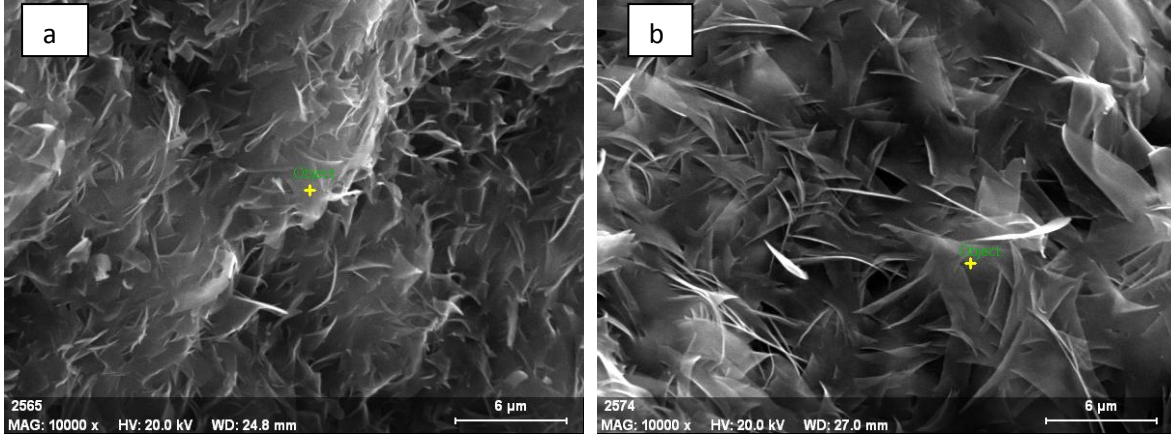


Şekil 4.11. Kuvars-kireç-çimento-alçı karışımıyla başlayan ticari gazbeton üretiminde fazların zamana bağlı gelişim ve kararlılık grafiği (İnt. Kaynağı 3.)

Şekil 4.11’de gösterilen diyagram üzerinden bakıldığında deneylerimizde uygulanan otoklav kürü şartlarında başlıca kuvars, tobermorit, CSH (I) ve diğer kristal C-S-H fazlarının bulunması beklenmektedir. Şekil 4.12’deki fazlar diyagram ile karşılaştırıldığında benzer faz bileşenlerine ulaşıldığı ancak tobermorit faz miktarının az olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12. Otoklav kürü sonucu elde edilen XRD analizi



Şekil 4.13. Silis dumanı içeren numunelerde SEM görüntüleri

4.4. Isı İletim Katsayısı Bulguları

Çalışmada ısı iletim katsayısı deneyi 4 bar otoklav kürü uygulanan seriler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kontrol serilerinde ısı iletim katsayısı ortalama 0,156 (W/mK) silis dumanı katkılı serilerde ise ortalama 0,135 (W/mK) olarak ölçülmüştür. Silis dumanı ikamesi ile birlikte ısı iletim katsayısının olumlu etkilendiği görülmektedir. Katkılı serilerin ısı iletim katsayısı ticari gazbetonun ısı iletim katsayısı değeriyle kıyaslandığında ise birbirine benzerlik göstermektedir.

Çizelge 4.1. Isı iletim katsayısı bulguları

	Kontrol Serisi	Silis Dumanı Katkılı Seri	Orijinal Gazbeton
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	0,156	0,135	0,20 (G2) 0,24 (G4) 0,27 (G6)

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada ticari gazbeton üretiminde ana hammadde olarak kullanılan silis kumu yerine uçucu kül kullanılmış ve çimento-uçucu kül-kireç-alçı sisteminde numuneler üretilmiştir.

Üretilen numunelerin birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığında, üç farklı kür şartında en uygun birim hacim ağırlık değerleri 4 bar otoklav küründe elde edilmiştir. Ancak birim hacim ağırlıklarındaki uygunluk bu kür koşullarındaki serilerin basınç dayanımlarında görünmemektedir. TS 453 standardına göre birim hacim ağırlık ve basınç dayanımlarına göre sınıflandırılan gazbetonlar için, çimento-uçucu kül-kireç-alçı sisteminde üretilen numunelerin birim hacim ağırlık ortalamalarına bakılırsa G4 sınıfında gazbeton üretiminde kullanılabileceği ancak numunelerin basınç dayanım değerleri ortalamalarına bakıldığında, bu sistemin G3 sınıfı gazbeton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir.

Kür şartlarında yapılan değişiklikler sonucunda ticari gaz betonlarda gözlenen temel hidratasyon fazlarından bir olan tobermorit fazının üretilen numunelerde gözlemlenmesinin yanı sıra, numunelerde bir başka kristal C-S-H fazının varlığı tespit edilmiştir. Etringit ve Xonotlit fazının varlığı dikkat çekicidir. Ticari gaz beton üretiminin başlangıç hammaddesi olan kuvars-kireç-çimento-alçı sisteminde gözlemlenmeyen bu faz, deneylerde kullandığımız çıkış hammaddeleri olan uçucu kül-kireç-çimento-alçı sisteminde rahatlıkla gözlemlenmiştir. Ticari gazbeton üretim prosesindeki otoklav basıncı 10-12 Bar uygulanmakta, yürütülen çalışmada ise 4 ve 8 Bar otoklav basıncı uygulanmıştır. Bunun mukavemet özellikleri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Ancak yapılan mikro analizler sonucu tobermorit fazlarının yeterince gelişemediği gözlenmiş bu sebeple buhar kürü uygulanan serilerin basınç dayanımları daha iyi çıkmıştır.

Sonuç olarak bu tez çalışması neticesinde, Seyitömer Termik Santrali uçucu külünün ve silis dumanının gazbeton üretiminde kullanılabileceği söylenebilir. Ülkemizde endüstriyel atık olarak adlandırılan ve depolama masraflarının yanında büyük çevre kirliliğine yol açan bu malzemelerin, gazbeton üretiminde kullanılması ile doğal hammadde korunumu sağlanmış olacak ayrıca çevreye ve kamuya verilen zarar da azaltılmış olacaktır.

Gazbeton üretiminde kullanılan pahalı malzemelerin yerine daha ucuz, ülke ekonomisine katma değeri olabilecek malzemelerin kullanımının, daha farklı kür şartlarının araştırıldığı

Çalışmaların yapılması hem ülkemiz hem de inşaat endüstrimiz ve bilim dünyamız açısından faydalı olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Ahmaruzzaman M. (2010). A Review on The Utilization Of Fly Ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**: 327-363.
- Aksoy T., U. (2008). Sandviç ve Gazbeton Duvar Uygulamalarının Ortalama Isı Geçirgenlik Katsayısı ve Isı Kaybı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **24**: 277-290.
- Albayrak M., Yörükoğlu A., Karahan S., Atlıhan S., Aruntaş H., Y., Girgin İ.(2007). Influence of Zeolite Additive on Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Building and Environment*, **42**: 3161-3165.
- Andolsun S. (2006). A Study on Material Properties of Autoclaved Aerated Concrete and Its Complementry Wall Elements: Their Compatıbility in Contemporary and Historical Wall Sections. Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aruntaş H., Y. (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* **21**: 193-203.
- 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.
- Borhan B. (1984). YTONG El Kitabı, Teknik Yayın No:2.
- Çelik Ç. (2005). Gazbeton Üretiminde Uçucu Külün Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çelik Ö., Yurter G., Kan S., Yeprem A., H. (2004). Farklı Puzolanik Katkıların Çimento Harçlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, **5**: 147-154.

- Çiçek Y., E. (2002). Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton, ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Demir İ. (2005). Uçucu Külün Hafif Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **1**: 21-24.
- Demir İ, Başpınar M. S., Görhan G., Kahraman E. (2002). Uçucu Kül Bölüm I: Oluşumu, Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **2**: 85 - 94.
- Duman R. (2010). Silis Dumanının Betonun Performansına ve Klor Geçirimsizliğine Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Ekinci C., E. (1995). Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Erdoğan S., T., Erdoğan T., Y. (2007). Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, 13 Nisan 2007, 263-276.
- Erdoğan T. Y. (2003). Beton. Metu Press, 1. Baskı.
- Grutzcek M., Kwan S., Di Cola M. (2004). Zeolite Formation in Alkali-Activated Cementitious Systems. *Cement and Concrete Research*, **34**: 949-955.
- Görhan G. (2006). Hafif Yapı Blokları Üretiminde Uçucu Külün Kireç ve Çimento İle Birlikte Kullanımının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

- Gündeşli U. (2008). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Hauser A., Eggenberger U., Mumenthaler T. (1999). Fly Ash From Cellulose Industry as Secondary Raw Material in Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **29**: 297-302.
- Holt E., Raivio P. (2005). Use of Gasification Residues in Aerated Autoclaved Concrete. *Cement and Concrete Research*, **35**: 796-802.
- Karaaslan Y., K. (2009). Gazbeton Yapı Malzemesinin Isıl Özelliklerinin Mevcut Standartlara Göre Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Karakurt C., Kurama H., Topçu İ., B. (2010). Utilization of Natural Zeolite in Aerated Concrete Production. *Cement and Concrete Composites*, **32**: 1-8.
- Kılınçkale M., F. (1996). Çeşitli Puzolanların Puzolanik Aktivitesi ve Bu Puzolanlarla Üretilen Harçların Dayanımı. *İMO Teknik Dergi*, 1217-1229.
- Kosmatka H., S., Kerkhoff B., Panarese W., C. (2003). Design and Control of Concrete Mixture. 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2003.
- Kömürlü R., Önel H. (2007). Gazbeton Yapı Ürünlerinin Konutlarda Kullanımı. *YTÜ Mim. Fak. E-Dergisi*, **2**: 145-158.
- Kurama H., Topçu İ., B., Karakurt C. (2009). Properties of The Autoclaved Aerated Concrete Produced From Coal Bottom Ash. *Journal of Material Processing Technology*, **209**: 767-773.
- Kurt E.,B. (2007). Silis Dumanının Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kus H., Carlsson T. (2003). Microstructural Investigations of Naturally and Artificially Weathered Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **33**: 1423-1432.
- Kutchko B., G., Kim A., G. (2006). Fly Ash Characterization by SEM-EDS. *Fuel*, **85**: 2537-2544.
- Laukaitis A., Fiks B. (2006). Acoustical Properties of Aerated Autoclaved Concrete. *Applied Acoustics*, **67**: 284-296.
- Laukaitis A., Keriene J., Mikulskis D., Sinica M., Sezemanas G. (2009). Influence of Fibrous Additives on Properties of Aerated Autoclaved Concrete Forming Mixtures and Strength Characteristics of Products. *Construction and Building Materials*, **23**: 3034-3042.
- Matsushita F., Aono Y., Shibata S. (2000). Carbonation Degree of Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **30**: 1741-1745.
- Matsushita F., Aono Y., Shibata S. (2004). Calcium Silicate Structure and Carbonation Shrinkage of A Tobermorite Based Material. *Cement and Concrete Research*, **34**: 1251-1257.
- Mostafa N., Y. (2005). Influence of Air-cooled Slag on Physicochemical Properties of Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **35**: 1349-1357.
- Mousa M., A., Uddin N. (2009). Experimental and Analytical Study of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (FRP)/Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Sandwich Panels. *Engineering Structures*, **31**: 2337-2344.
- Narayanan N., Ramamurthy K. (2000). Structure and Properties of Aerated Concrete: A Review. *Cement and Concrete Composites*, **22**: 321-329.
- Newman J., Owens P. (2003). Properties of Lightweight Concrete. *Advanced Concrete Technology*, Set 2003: 3-29.

- Önel M., Can Ö., Tokgöz H., Koçak A. (2007). An Experimental Study About The Compressive Strenght and Reinforcement Adherence of Aerates Concrete Panels Having Spalling Property. *Sigma Journal of Engeneering and Natural Sciences*, **25**: 161-169.
- Özgeç İ., Sarısözen B. (1999). Gazbeton Üretiminde Perlit Kullanılabilir Mi?. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 14-15 Ekim 1999, İzmir, Türkiye.
- Pehlivanlı Z. (2009). Gazbeton Malzemesinin Isıl İletkenliğinin Nem ve Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesi. *Int. J. Eng. Research Development*, **1**: 76-80.
- Ramamurthy K., Narayanan N. (2000). Influence of Composition and Curing on Drying Shrinkage of Aerated Concrete. *Materials and Structures*, **33**: 243-250.
- Tanaçan L., Ersoy H., Y., Arpacioğlu Ü. (2009). Effect of High Temperature and Cooling Conditions on Aerated Concrete Properties. *Construction and Building Materials*, **23**: 1240-1248.
- Topçu İ., B., Demir A., Karakurt C. (2005). Gazbeton Kırıklarının Betonda Agrega Olarak Kullanılması. Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart 2005, Kocaeli, Türkiye.
- TS EN 197-1 (2002). Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450 (1998). Uçucu Kül - Betonda kullanılan - Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 451-1 (2000). Uçucu Kül - Deney Metodları - Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 451-2 (2000). Uçucu Kül - Deney Metodu - Bölüm 2: Islak Eleme ile İncelik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 453 (1988). Gaz ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları, , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 639 (1975).Uçucu Küller, , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS 640 (1992). Çimento-Uçucu Küllü Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Trunk B., Schober G., Helbling A., K., Wittmann F., H. (1999). Fracture Mechanics Parameters of Autoclaved Aerated Concrete. *Cement and Concrete Research*, **29**: 855-859.

Türker, P., Erdogan, B., Katnas, F., Yeginobalı, A. (2009). Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. TÇMB, Ankara.

Ün H., PAÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Ders Notları, Denizli, 2007.

Ünverdi A. (2006). Yüksek Sıcaklık Altında Gazbeton Kırıklılı Betonların Dayanımlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir .

Wongkeo W., Chaipanich A. (2010). Compressive Strenght, Microstructure and Thermal Analysis of Autoclaved and A ir Cured Structural Lightweight Concrete Made With Coal Bottom Ash and Silica Fume. *Materials Science and Engeneering*, **A 527**: 3676-3684.

Yeğınobalı A. (2009). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı. TÇMB, Ankara.

Yıldız T. (1998). Uçucu Kül ve Polipropilen Atıklarının Değişik Kombinasyonlarda Kompozit Malzeme Üretiminde Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, , Elazığ.

İnt. Kaynağı 1. [http:// www.veribaz.com](http://www.veribaz.com)., 12/01/2011

İnt. Kaynağı 2. [http:// www.akg-gazbeton.com](http://www.akg-gazbeton.com)., 09/01/2011

İnt. Kaynağı 3. <http://www.pb-aac.de> Letzte Änderung | last changed: 24.07.2010

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Kadir GÜÇLÜER

Doğum Yeri ve Tarihi: Ankara, 22.05.1987

Yabancı Dili: İngilizce

İletişim (Telefon/e-posta): 0505 410 06 67/ kgucluer@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Ankara Kurtuluş Lisesi, 2004.

Lisans: Afyon Kocatepe Üni., T.E.F., Yapı Eğitimi, 2009.

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üni., F.B.E, Yapı Eğitimi A.B.D., 2011.

Yayımları (SCI ve diğer):

- 1.Güçlüer K., Ünal O., (2010), Uçucu Kül İçeriğinin Beton Basınç Dayanımı ve Geçirimliliği Üzerine Etkisinin Araştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, **Cilt:6**, No:1, 2010(11-18).