

**GAZBETON ÜRETİMİNDE UÇUCU KÜLÜN
HAMMADDE OLARAK KULLANIMININ
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞERİFE KOZAK

DANIŞMAN

Doç. Dr. İsmail DEMİR

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2010

Bu Yüksek Lisans Tezi 109M245’No’lu TUBİTAK Projesi ile desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GAZBETON ÜRETİMİNDE UÇUCU KÜLÜN HAMMADDE
OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

ŞERİFE KOZAK

DANIŞMAN

Doç. Dr. İsmail DEMİR

YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2010

ONAY SAYFASI

Doç. Dr. İsmail DEMİR danışmanlığında,
Şerife KOZAK tarafından hazırlanan
Gazbeton Üretiminde Uçucu Külün Hammadde Olarak
Kullanımının Araştırılması başlıklı bu çalışma lisansüstü eğitim ve öğretim
yönetmeliğinin ilgili maddeleri
uyarınca
...../...../.....
tarihindeki aşağıdaki jüri tarafından
Yapı Eğitimi Anabilim Dalında
Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/ oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Ünvanı, Adı, SOYADI

İmza

Başkan

Üye

Üye

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

Doç. Dr. Rıdvan ÜNAL
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1 Hafif Betonlar	7
2.1.1 Hafif Beton Tipleri	8
2.1.2 Hafif Betonun Sınıflandırılması	9
2.1.3 Hafif Betonun Avantajları	12
2.1.4 Hafif Betonun Dezavantajları	12
2.2 Gazbeton	12
2.2.1 Gazbeton Üretimi	14
2.2.2 Gazbeton Özellikleri	16
2.2.2.1. Gazbetonun Fiziksel Özellikleri	16
2.2.2.2. Gazbetonun Kimyasal Özellikleri	21
2.2.2.3 Gazbetonun Mekanik Özellikleri	22
2.2.3 Gazbetonun Sağladığı Yararlar	24
2.2.3.1 Tasarımda Sağladığı Yararlar	24
2.2.3.2 Yapımda Sağladığı Yararlar	25
2.2.3.3 Yapıda Sağladığı Yararlar	26
2.3 Puzolanlar	29
2.3.1 Puzolanların Sınıflandırılması	32
2.3.1.1 Doğal Puzolanlar	32
2.3.1.2 Yapay Puzolanlar	35

2.4.Uçucu Kül	37
2.4.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması	40
2.4.2 Uçucu Külün Özellikleri	42
2.4.2.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	43
2.4.2.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	45
2.4.2.3 Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri	47
2.4.2.4 Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri	50
2.4.3 Uçucu Külün Kullanım Alanları	51
2.4.3.1 Gazbeton Yapımında Kullanımı	53
3. MATERYAL ve METOT	54
3.1 Kullanılan Malzemeler	54
3.1.1 Uçucu Kül	54
3.1.1.1 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	54
3.1.1.2 Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri	55
3.1.1.3 Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri	56
3.1.2 Çimento	57
3.1.3 Kireç	58
3.1.4 Kimyasal Katkılar	59
3.1.4.1 Priz Hızlandırıcı Katkı	59
3.1.5 Su	59
3.2 Metot	60
3.2.1 Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	62
3.2.1.1 Birim Hacim Ağırlık Değerleri	62
3.2.1.2 Basınç Dayanımı	63
3.2.1.3 Isı İletkenlik Deneyi	64
4. BULGULAR	65
4.1 Örneklerin mekanik özellikleri	65
4.2 Örneklerin Otoklav kürü sonrası mikroyapı analiz sonuçları	66
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	69

6. KAYNAKLAR	70
6.1 İnternet Kaynakları	78
ÖZGEÇMİŞ	80

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GAZBETON ÜRETİMİNDE UÇUCU KÜLÜN HAMMADDE OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

Şerife KOZAK

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail DEMİR

Bu çalışmada, gazbeton üretiminde uçucu külün hammadde olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Gazbetonun ana hammaddesi olarak Seyitömer (Kütahya) termik santralinden alınan uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak TS EN 197-1 CEM I 42,5 R çimentosu ve karışım harcının genişerek gözenek oluşumunu sağlamak için alüminyum tozu ve sönmemiş kireç kullanılmıştır.

Uçucu kül, çimento, sönmemiş kireç, alçı ve genişletirici katkı olarak alüminyum tozundan oluşan 6 farklı seri üretilmiştir. Bu karışımda alüminyum tozunun, su ve hidratasyona uğrayan kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile tepkimeye girmesi sonucu kalıplara dökülen taze harcın genişmesine yol açarak gözenekli bir bünyenin oluşumu sağlanmıştır. Harcın priz süresini kısaltmak amacı ile bazı serilerde priz hızlandırıcı katkıları (CaCl ve NaSO_4) kullanılmıştır. Deney örneklerine ortalama 8 saat süre ile düşük basınçlı (1,15 Bar) otoklavda kür uygulanmıştır.

Deney örnekleri üzerinde fiziksel ve mekanik testler yürütülmüştür. Bünnyede gelişen faz yapılarını belirlemek için mikroyapı analizleri (SEM incelemeleri, XRD analizleri) ve termal analizler yürütülmüş (ısı iletkenlik katsayısı) ve ticari gazbeton örnekler ile karşılaştırılmıştır.

2010, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: Gazbeton, Uçucu Kül, Puzolan, Geri dönüşüm, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Isı iletkenliği, Otoklav.

ABSTRACT

Postgraduate Thesis

TO INVESTIGATE THE USE OF FLY ASH AS RAW MATERIAL IN PRODUCTION OF AERATED CONCRETE

Şerife KOZAK

Afyon Kocatepe University

Institute of Science and Technology

Department of Construction Education

Counselor: Associate Professor İsmail DEMİR

In this study, in the production of aerated concrete using fly ash as raw material availability has been investigated. Fly ash taking from Seyitömer (Kütahya) thermal power plants is used as main raw material. TS EN 197-1, CEM I as a binder (42.5 R) and the mixture of cement mortar to ensure the formation of pores by expansion of aluminium powder and quicklime are used.

Fly ash, cement, quicklime, gypsum, and the aluminium powder consisting of expansion additives produced six different series. Aluminium powder reacts with calcium hydroxide and fresh mortar is poured into moulds as a result of expansion led to the formation of the porous structure is provided. In order to shorten setting time of the mortar some accelerator additives (such as CaCl , NaSO_4) was used in some series. Test samples were cured in autoclave for average 8 hours with the low-pressure (1.15 bar).

Physical and mechanical tests experiments were conducted on samples. In the development phases within the microstructure analysis (SEM and XRD) was conducted to determine the structure, thermal conductivity coefficients were determined and compared with commercial gas concrete examples.

2010, 80 page

Keywords: Aerated autoclaved concrete, fly ash, pozzolan, recycling, mechanical properties, microstructure, thermal conductivity and autoclave.

TEŞEKKÜR

Tez danışmanım Sayın Doç. Dr. İsmail DEMİR'e, mikroyapı analiz çalışmalarında yardımcı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Serhat BAŞPINAR'a, deneylerin yürütülmesinde yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Erhan KAHRAMAN'a, Öğr. Gör. Dr. Tayfun UYGUNOĞLU'na, hiçbir zaman manevi desteklerini esirgemeyen annem Ayşe YALAZ'a, eşim Mehmet KOZAK'a, arkadaşım Hatice SEZER'e ve biricik kızım Deva KOZAK'a teşekkür ederim.

Ayrıca verdiği destek için TUBİTAK'a (Proje no: 109M245) teşekkür ederim.

Şerife KOZAK
AFYONKARAHİSAR, Ağustos 2010

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

Bd	Hacim ağırlığı(Birim ağırlık)
Db	Desibel
Dh	Bulk Yoğunluk (Birim Ağırlık)
Fb	Basınç mukavemeti
gr	Gram
Gr.Y.	Gürünür yoğunluk
Kcal	Kilokalori
kgf	Kilogramkuvvet
lt	Litre
μ	Buhar Geçirgenlik Direnci Katsayısı
°C	Santigrad derece

2. Kısaltmalar

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Beton Test Metotları Standardı
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1 Gazbeton üretim şeması	16
Şekil 3.1 Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogram	56
Şekil 3.2 STS Uçucu külünün lazer tane boyutu analizi	57

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa No
Resim 2.1 Gazbetonun sembolik görünümü	13
Resim 2.2 Sulu kıvamda gazbeton harcı kalıbın 2/3'ü dolacak biçimde dökülür (kabarma oluşmadan önce)	15
Resim 2.3 Akıcı kıvamda gazbeton harcının kabarmasıyla kalıbı doldurması	15
Resim 2.4 Genleşme sürecinde ürün içinde milyonlarca hava gözeneği oluşur	17
Resim 2.5 Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM' de görünümü	48
Resim 3.1 Uçucu kül içerisindeki silika küreciklerinin şekil ve boyut görünümleri	56
Resim 3.2 Malzemelerin el mikseriyle karıştırılması	61
Resim 3.3 Otoklav	61
Resim 3.4 Etüvden çıkan malzemelerin gözenek kontrolü	62
Resim 3.5 Basınç pres	63
Resim 4.1 Yüksek ve düşük oranda çimento içeren karışımların SEM içyapı görüntüleri	66
Resim 4.2 Yüksek çimento içerikli (yüksek mukavemetli) numunede etringit oluşumları	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa No
Çizelge 1.1	Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller	5
Çizelge 2.1	Hafif beton tipleri, kullanım alanları ve özellikleri	9
Çizelge 2.2	Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması	10
Çizelge 2.3	Birim ağırlıklarına göre hafif betonların sınıflandırılması	10
Çizelge 2.4	Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları	11
Çizelge 2.5	Gazbetonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri	18
Çizelge 2.6	Kuru gazbetonun ısı iletkenlik değerleri	18
Çizelge 2.7	Ticari bir gazbetonun mekanik özellikleri	22
Çizelge 2.8	Gözenekli beton yapı malzeme ve elemanlarının sınıfları	23
Çizelge 2.9	UK ile ilgili Türk standartları	39
Çizelge 2.10	ASTM’ ye göre uçucu kül sınıfları	41
Çizelge 2.11	Uçucu külün özellikleri	42
Çizelge 2.12	Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	44
Çizelge 2.13	Türkiye’deki uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı ve özgül yüzey alanları	44
Çizelge 2.14	Değişik termik santral uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu	46
Çizelge 2.15	Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar	52
Çizelge 3.1	Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları	55
Çizelge 3.2	CEM I 42,5R Portland kompoze çimentosu özellikleri	58
Çizelge 3.3	Kirecin fiziksel ve kimyasal analizleri	58
Çizelge 3.4	Kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri	59
Çizelge 3.5	Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım oranları.	60
Çizelge 4.1	Deney numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri	65

1. GİRİŞ

Normal betonların sakıncalı taraflarını giderebilmek için üretilmesi zorunlu olan özel amaçlı betonlarda da atıkların kullanılabilir olması hem özel amaçlı betonların katı atıklar sayesinde üretilmesine hem de katı atıkların bu özel amaçlı beton üretiminde kullanılmasıyla geri dönüşümüne imkan sağlanmış olur. Özel amaçlı beton üretilme ihtiyacının doğmasının başında, normal betonların yüksek ısıya dayanamaması, gerekli tedbirlerin alınmamasıyla ısıyı ve rutubeti geçirmesi sökülüp tekrar kullanılma imkanından yoksun oluşu, tamirinin zor veya olanaksız oluşu gibi durumlar gelir (Bingöl 2002).

Hafif betonlar, özel amaçlı üretilmiş betonların başında gelir. Normal betonların birim ağırlığı 2240 ila 2400 kg/m³ aralığında iken hafif betonlar, 1440 ila 1840 kg/m³ aralığında birim ağırlıklara sahiptirler. Hafif beton kullanımasındaki birinci amaç yapılarıdaki ölü yükün azaltılması ve böylece dizayn yapılırken kolon, kiriş ve temel boyutlarının daha küçük seçilebilmesine olanak sağlanmasıdır. Binalarda hafif beton kullanımı, kullanılan yapının yangına daha dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca hafif betonun kullanımı enerji tasarrufu göz önüne alındığında duvar elemanlarında yalıtım özelliklerini geliştirir. Hafif betondaki gözeneklilik bir su kaynağı oluşturarak içsel kür oluşmasını ve betonda devamlı artan dayanım ve dayanıklılık oluşturur (National Ready Mixed Concrete Association 2003).

Gazbeton, hafifletilmiş yapı elemanları üretmek için geliştirilmiş teknoloji ile elde edilen bir malzemedir (Kömürlü, Önel 2007). Gazbeton, beton veya geleneksel kâgir malzemelere oranla çok hafif, buna ek olarak, içindeki hava kabarcıkları nedeniyle yüksek ısı yalıtım özelliğine sahip, bir tür hafif beton olarak yapı sektöründe aranan bir malzemedir. Yapısındaki hava kabarcıkları dolayısıyla bu malzemeye gazbeton adı verilmiştir. İngilizce adı "Autoclaved Aerated Concrete - AAC", Almanca adı "Porenbeton" dur.

Gazbeton malzemeler bünyesindeki gözenekleri ve nedeniyle yapı sahibine yüksek ısı yalıtımı, kolay işlenebilirlik, iş gücü verimliliği ve deprem emniyeti sağlar. Üretim

sürecinde kesinlikle çevre kirliliği yaratmaz, tehlikeli atıklar oluşturmaz ve ülke ekonomisi için değerli hammaddeler heba edilmez. Üretiminde düşük sıcaklıktaki buhar ile sertleştirme süreci enerji tasarrufu sağlar.

Gazbeton ile ilgili ilk patent 1923 yılında İsveçli mimar Johann Erikson tarafından alınmıştır. Bu patent otoklav kürü ve buhar kürü uygulanan betonlarda alüminyum tozu kullanmayı kapsamaktaydı. Geniş kullanım özelliği ve hafifliği nedeni ile gazbeton inşaat sektöründe önemli bir yere sahiptir. Tarihi kayıtlara göre ilk ticari gazbeton 1929 yılında İsveç'te üretilmeye başlanmıştır. İsveç kaynaklı olan gazbeton 2. Dünya savaşı sonrasında dünyanın diğer bölgelerine hızla yayılmıştır (Bave 1983).

Türkiye, Dünya'nın büyük gazbeton üreticisi ülkeleri arasındadır. Gazbeton tüketimi ile Avrupa ülkeleri arasında ilk beşe girmektedir. Ülkemizde, Gazbeton Yapı Malzeme ve Elemanları ilk olarak 1950'lerde İstanbul Hilton Oteli inşaatında, Almanya'dan ithal edilerek uygulanmıştır. 1963'te ilk gazbeton fabrikası İstanbul Pendik'te, Ytong markasıyla üretime geçmiştir (İnt. Kyn. 1).

Gözenekli betonlar genellikle; serbest drenajın gerekli olduğu veya daha az kütle ve ısı geçirgenliği gerektiği yapılarda kullanılır. En az üç belirgin tipte gözenekli beton üretilir. Bunlar; taze çimento hamuru içinde kimyasal tepkimeler sonucu açığa çıkan gaz baloncukları veya köpük oluşturularak üretilen, doğal ya da sentetik hafif agregaların kullanılmasıyla olağanüstü gözenekli yapıların elde edilmesiyle üretilen, tek tip kaba agrega kullanılıp ince agreganın tamamen çıkarılmasıyla üretilen betonlardır. Bunların üçü de gözenekli betonlar olmasına karşın her biri farklı boşluk yapılarına sahiptir. Hücreli ve hafif agrega içeren betonlar çok büyük oranlarda boşluk içerirler fakat bu boşluklar birbirleriyle oldukça bağlantısızdırlar. İnce agrega kullanılmadan üretilen betonlarda ise büyük oranda birbiriyle içsel bağlantılı boşluklar içeren bir yapı oluşur (EM 1110-2-2000, 1994).

Atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal kaynakların tüketimini azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda çevrede meydana gelecek problemleri en aza indirmektedir. Ülkemizde, enerji üretimi için yaygın olarak

kullanılan termik santrallerin önemli bir atığı olan uçucu kül bu konuda önemli bir örnek teşkil etmektedir (Aydın 2007).

Ülkemizde ve diğer ülkelerde enerji üretimi amacı ile çalışan termik santraller, çalışmaları sırasında büyük miktarda uçucu kül ve kazan altı cürufu adı verilen atıklar açığa çıkarmaktadırlar. Uçucu küllerin, teknik, ekonomik ve çevresel şartlarda göz önüne alındığında, inşaat sektöründe değerlendirilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir (Ünal ve Uygunoğlu 2004).

Uçucu külün özellikleri, bu malzemenin puzolanik bir malzeme olduğunu ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Türkiye’de elektrik enerjisi, kömüre dayalı termik santrallerden ve hidroelektrik santrallerinden elde edilmektedir. Son yıllarda bunlara üçüncü olarak doğalgaz santralleri de katılmıştır. Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen ve elektro filtreler yardımı ile tutularak atmosfere çıkışı önlenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir (Neville 1981, Tokyay ve Erdoğan 1998).

Endüstriyel bir atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75- %80’i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir ve “uçucu kül” denilmektedir (Erdoğan 2003).

Bütün dünyada bir yılda üretilen toplam UK’ün ancak % 25’den daha azı değerlendirilmektedir. Almanya, Hollanda ve Belçika’da üretilen toplam UK’ün % 95’den fazlası, İngiltere’de ise yaklaşık % 50’si kullanılmaktadır. Diğer taraftan büyük miktarlarda UK üretilen A.B.D. ve Çin’de sırasıyla yaklaşık % 32 ve % 40 oranında UK kullanıldığı görülmektedir. 1990 yılı verilerine göre Türkiye’de UK kullanım oranı, % 1’den daha azdır. Son yıllara ait yeni veriler ise elde edilememiştir. UK’lerin bacalarda tutulması ile günümüzün çok önemli problemlerinden biri olan hava ve toprak dolayısıyla çevre kirliliği de kısmen önlenmiş olmaktadır. Öte yandan UK’lerin

biriktirilmesi veya atılması, önemli oranda çevre kirliliğine yol açmaktadır. UK'lerin neden olduğu çevre problemleri arasında tozlanma, tarım ürünlerine zarar verme, yağmur ve rüzgar erozyonu, toprakta süzülme dolayısıyla toksik madde taşınması ve radyasyon sayılabilir. Bu çevre sorunları nedeniyle tarım ürünleri, su ve havanın kalitesi, doğal hayat, bölgenin ekonomik durumu ve çevre güzelliği açısından istenmeyen sonuçlar ortaya çıkmaktadır.

Yukarıda sayılan sorunların çözümlenmesi, UK'lerin çeşitli kullanım alanlarında değerlendirilerek ülke ekonomisine kazandırılması ile mümkün görünmektedir. UK'lerin değerlendirildiği sektörlerin başında ağırlıklı olarak inşaat sektörü gelmektedir. Bundan başka UK; kimya, seramik, cam, cam-seramik, döküm-metal sanayi, tarım sektöründe zemin ıslahı, çevre, sondaj çalışmaları, buzlanmanın önlenmesi ve maden ocaklarında filler olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır.

Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kaplamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olurlar. Bu gün Dünya'da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır (Türker vd. 2003).

Uçucu kül terimi, 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi tüketiminin yaygınlaşması sonucunda ortaya çıkmıştır. 1970'li yıllarda yaşanan enerji maliyetindeki hızlı artış sonucunda, elektrik santrallerinde daha fazla kömür tüketilmeye başlanmıştır. Bunun sonucunda uçucu kül üretiminde bir artış meydana gelerek, uçucu kül kullanımı tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır (Özcan 1997).

Türkiye'de elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının üretildiği termik santrallerde 55 milyon ton/yıl düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta ve bunun sonucunda da bacalardan 1993 yılı verilerine göre 13,5 milyon ton/yıl, 1998 yılı verilerine göre ise yaklaşık 13 milyon ton/yıl UK elde edilmektedir. Bu miktar, A.B.D.'de 45 milyon ton/yıl ve Hindistan'da 50 milyon ton/yıl dolayındadır (Aruntaş 2006).

Türkiye’de halen sadece kömür ile çalışan 15 adet termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallere ait bilgiler, alfabetik olarak Çizelge 1.1’de verilmiştir (İnt. Kyn. 3).

Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Türker vd. 2003).

Türkiye’de UK kullanımına ait detaylı veriler bulunmamakla birlikte genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığı görülmektedir (Tokyay 1993).

Çizelge 1.1 Türkiye’deki kömürle çalışan termik santraller (İnt. Kyn. 3)

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

Türkiye’de uçucu kül üretimi ve kullanımı 1968’li yıllarda başlamıştır ve günümüzde ise uçucu küllerin kullanım alanları oldukça fazladır. Bunlar arasında; çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi ve beton içinde ikincil bağlayıcı madde olarak çimentoyla birlikte, tuğla ve yapı bloğu üretiminde; suni agrega üretiminde, enjeksiyon uygulamalarında, dolgu malzemesi olarak, yol inşaatlarında temel ve temel altı tabakası

olarak, zemin iyileştirilmesinde, atıkların stabilizasyonunda ve zirai amaçlarla kullanım sayılabilir (Özcan 1997).

Bu çalışmada Seyitömer (Kütahya) Termik Santralinden alınan uçucu kül silis kaynağı olarak kullanılmıştır. Farklı karışım oranlarında sulu kıvamda hazırlanan gazbeton harçları kalıplara dökülerek genleşmesi sağlanmıştır. Gazbeton deney örneklerine düşük buhar basınçlı (1,15 Bar) otoklav kürü uygulanmıştır. Örneklerin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Örneklerin mikroyapıları SEM ve XRD tekniği ile incelenerek bünyede gelişen faz yapıları belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Hafif Betonlar

TS EN 206-1’de hafif beton, etüv kurusu durumdaki birim hacim ağırlığı, 800 kg/m^3 ’ten büyük, 2000 kg/m^3 ’ten küçük olan beton olarak tanımlanmaktadır. Hafif beton, yapımında kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı farklı tip ve özelliklere sahip hafif agregaların kullanılmasıyla da üretilebilir (TS EN 206- 1, 2002).

TS 2511’e göre de, karakteristik basınç dayanımı 17 MPa ’dan daha büyük olan ve birim hacim ağırlığı en fazla 1900 kg/m^3 olan hafif agregalı betonlar, taşıyıcı hafif beton olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif betonların özellikleri, hafif beton üretiminde kullanılan agregaların karakteristik özellikleriyle doğrudan ilgilidir (TS 2511, 1977).

Bir başka tanımıyla; iri agrega olarak hafif agreganın, ince agrega olarak da doğal kum veya hafif agrega kırıntılarının normal çimento ile birlikte kullanıldığı betonlara ya da birim ağırlığı normal betonlardan belirli miktarda küçük olan betonlara hafif beton denir.

Ağırlığı az, ısı yalıtımı yüksek, dayanımı yeterli ve yanmaz bir madde olan hafif beton geleceğin mimarlığı açısından büyük önem taşıyan bir malzemedir. Normal betondan ayrıcalığı, hafifliği ve ısı yalıtımını sağlayan boşlukları bulunmasıdır. Boşluklar, boşluklu agrega kullanılarak (bims veya pomza taşı, genleşmiş kil, cüruf, perlit vb.) veya boşluklu içyapı oluşturularak ya da ince harç içinde gaz kabarcıkları oluşturmak yoluyla (gazbeton ve köpük betonu) sağlanmaktadır.

Hafif beton hakkında yapılan çalışmalarla özellikle yüksek dayanımlı genleşmiş kil ve şist yapay agregaları kullanımı ile beton birim ağırlığı $1,6 \text{ kg/dm}^3$ ’ün altına indirilmiş ve toplam yapı ağırlığında % 20- 25 oranında azalma sağlanmıştır. Yapı yükünün azalması ile kullanılan donatı miktarında azalma sağlanmıştır. Kesitler küçülmüş, daha büyük açıklıkların geçilebilmesi ve dolayısıyla düşük emniyet gerilmeli zeminlerde yapı yapılabilmesi sağlanmıştır. Sonuçta maliyette büyük ölçüde düşmelere neden

olmaktadır. Hafif malzemelerin kullanılması büyük boyutlarda prefabrik elemanlar yapılmasına da olanak vermektedir. Böylelikle inşaat yapım hızı artmakta, işçilik ve zamandan kazanç sağlanabilmektedir. Betonun birim hacim ağırlığının düşmesi ısı yalıtım kabiliyetinin artmasına da neden olmaktadır. Bu yüzden hafif betonlar iyi ısı yalıtım malzemeleridir. Hafif betonlar duvar elemanı olarak kullanıldıkları zaman tuğlaya göre daha az bir duvar kalınlığı oluştururlar (Topçu 2006).

Ses ve ısı yalıtımı özelliğinde önemli ölçüde yarar sağladığından izolasyon için ikinci bir malzeme kullanılmayacağından dolayı ekonomi sağlamaktadır. Yoğunluğunun az olmasından dolayı depremden daha az etkilenecek can ve mal kaybı daha az olacaktır. Donma çözölmeye karşı dayanımı daha fazladır çünkü beton içindeki birbirinden bağımsız boşluklar su ile tamamen dolmadığından dondan dolayı meydana gelecek içsel gerilmeden çok az etkilenecektir (Ünal 2004).

2.1.1 Hafif Beton Tipleri

En az üç belirgin tipte gözenekli beton üretilebilir. Bunlar; taze çimento hamuru içinde kimyasal tepkimeler sonucu açığa çıkan gaz baloncukları veya köpük oluşturularak üretilen, doğal ya da sentetik hafif agregaların kullanılmasıyla olağanüstü gözenekli yapıların elde edilmesiyle üretilen, tek tip kaba agregaya kullanılıp ince agreganın tamamen çıkarılmasıyla üretilen betonlardır. Bunların üçü de gözenekli betonlar olmasına karşın her biri farklı boşluk yapılarına sahiptir (Ünverdi 2006).

Hafif beton tipleri, kullanım alanları ve özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Topçu 2006).

Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar beş grupta toplanabilir:

- Doğal hafif agregalar: Pomza taşı, volkanik tüf, volkanik cüruf gibi,
- Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş kil, şist, arduaz ve perlit gibi,

- Endüstriyel atıklardan oluşan hafif agregalar: Yüksek fırın cürufları, uçucu kül gibi,
- Organik hafif agregalar: Hububat tanecikleri, ağaç parçacıkları gibi malzemeler,
- Polimer kökenli malzemeler: Styropor gibi (Topçu vd. 2005).

Çizelge 2.1 Hafif beton tipleri, kullanım alanları ve özellikleri (Topçu 2006)

Türü (kullanım alanı)	Malzemesi	Özellikleri		
		Birim Ağ. (kg/dm ³)	Basınç dayanımı (MPa)	Isı iletkenlik (kcal/mh)
Yalıtım betonu(çatı vb.)	Genleşmiş perlit plastik köpüğü, talaş betonu, gaz betonu	0,2- 0,6	0,2- 2,5	0,05- 0,20
Hem yalıtım hem taşıyıcı beton (dış duvar)	Bims betonu, genleşmiş kil, cüruf betonu, gaz beton	0,6- 1,2	2,5- 10	0,2- 0,45
Taşıyıcı hafif betonarme, öngerilmeli beton	Genleşmiş kil, yüksek fırın cürufu, sinterlenmiş uçucu kül	1,2- 2,0	15- 60	0,45- 1

2.1.2 Hafif Betonun Sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması, genellikle hem birim ağırlık hem de mukavemet koşuluna göre yapılmaktadır. Yalıtım betonlarından taşıyıcı olanlara kadar bütün hafif betonların özellikle birim ağırlık bakımından sınıflandırılmasında değişik kabuller vardır.

Birim ağırlıkları 1840 kg/m³'ü geçmeyen ve 28 günlük silindir basınç dayanımı 17 N/mm²'i aşan betonlar hafif beton sınıfına girerler. Genel olarak hafif betonların birim ağırlıklarının pratik değişim aralığı 300–1800 kg/m³'tür.

Hafif betonların sınıflandırılması DIN 1045 birim hacim ağırlıklarına (BHA) göre;

- Hafif betonlar: BHA < 20 KN/m³

- Normal betonlar: $20 \text{ KN/m}^3 < \text{BHA} < 28 \text{ KN/m}^3$
- Ağır betonlar: $\text{BHA} > 28 \text{ KN/m}^3$ (Akbaba, 2007).

TS 2511 'de ise, birim hacim ağırlık esasına göre;

- Hafif betonlar: $\text{BHA} < 19 \text{ KN/m}^3$
- Yarı hafif betonlar: $\text{BHA} 19- 21 \text{ KN/m}^3$
- Normal betonlar: $\text{BHA} 21- 24 \text{ KN/m}^3$ (TSE 2511, 1977).

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

Çizelge 2.2 Hafif betonların yoğunluklarına göre sınıflandırılması (TS EN 206- 1, 2002)

Yoğunluk Sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Birim Hacim	≥ 800	> 1000	> 1200	> 1400	> 1600	> 1800
Ağırlığı (kg/m^3)	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

Diğer yandan, birim hacim ağırlığı Çizelge 2.3'de gösterildiği gibi 800 ile 1400 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları 10 MPa 'dan düşük olan hafif betonlar, yalıtım betonu; birim hacim ağırlığı 1400 ile 1600 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları da 16 MPa 'a kadar olan betonlar yarı taşıyıcı hafif beton; birim hacim ağırlığı 1600 ile 1900 kg/m^3 arasında olan ve basınç dayanımları da 17 MPa 'dan daha fazla olan hafif betonlar taşıyıcı veya yapısal hafif beton olarak da sınıflandırılmaktadırlar (Şimşek 2004).

Çizelge 2.3 Birim ağırlıklarına göre hafif betonların sınıflandırılması (Şimşek 2004)

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

Hafif betonların basınç dayanımları açısından birçok sınıflandırılma yapılmıştır. Bunun nedeni de, hafif agregalı beton üretiminde dayanımları birbirinden farklı olan hafif agregaların kullanılmasıdır. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI, 1970)'ne göre hafif betonlar, yalıtım için kullanılan düşük dayanımlı betonlar, dolgu amacı ile kullanılan orta dayanımlı hafif betonlar ve betonarme betonu olarak kullanılan yapısal hafif betonlar olarak üç gruba ayrılmıştır. Rilem (1978) hafif betonları ağırlıkları ve dayanımlarına göre yapısal, yapısal-yalıtım ve yalıtım betonu olarak sınıflandırmıştır.

Özellikle son yıllarda kimyasal katkıların önemli gelişmelerine paralel olarak yüksek dayanımlı hafif agregalı betonlar üretilebilir hale gelinmiştir (Uygunoğlu 2008).

TS EN 206-1'de de hafif betonlar basınç dayanımlarına göre Çizelge 2.4'de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar sınıflandırılmışlardır (TS EN 206- 1, 2002).

Çizelge 2.4 Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları (TS EN 206- 1, 2002)

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı F_{ck}, Silindir (N/mm²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı F_{ck}, Küp (N/mm²)
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

2.1.3 Hafif Betonların Avantajları

- Hafif betonların kullanılmasıyla yapıların ağırlığında önemli bir azalma sağlanır. Böylece betonarme elemanların kesitleri de azaltılabilir.
- Hafif betonların ısı iletkenlik katsayısı çok küçüktür. Bu özelliğinden dolayı hafif betonun kullanılması halinde iç mekanlarda oda sıcaklığı çok daha az yakıt kullanılarak elde edilir. Çevreye verilen hasar da azaltılmaktadır.
- Hafif betonların bazıları ahşap gibi kolayca kesilebilir ve çivi çakılabilir.
- Agregalar saftır.

2.1.4 Hafif Betonların Dezavantajları

- Boşluklu bir yapıya sahip olduklarından istenilen dayanımı sağlayamazlar.
- Aşınma dayanımları yetersizdir.
- Neme karşı yalıtılmaları gerekir.
- Elastisite modülleri düşüktür fakat deprem sırasında deplasmanları büyüktür.
- Hidratasyon ısıları yüksek olduğundan, sıcaklık artar.
- Daha fazla çimento gerekmektedir.
- Hafif agregalı betonlar daha kırılgeçirirler (Uygunoğlu 2008).

2.2 Gazbeton

TS 453 “Gazbeton ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları Standard”ı, gazbeton ve köpük betonu birlikte ele alarak tanımlamıştır. İnce öğütölmüş silisli bir agrega ve inorganik bir bağlayıcı madde (kireç/çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturuocu bir madde ilavesi ile hafifletilmesi ve buhar küruyle sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli hafif beton olarak tanımlamaktadır (TS 453, 1989). Gazbeton, hafifletilmiş yapı elemanları üretmek için geliştirilmiş teknoloji ile elde edilen bir malzemedir.

Bir başka tanımıyla; kum, çimento, sönmemiş kireç, çok düşük konsantrasyonda alçıtaşı ve su karışımına gözenek oluşturucu alüminyum ilave edilmesiyle elde edilir. Milimetrik olarak kesilerek otoklavlarda nihai kristal yapısına ulaşan Gazbeton bu gözenekli yapısı sayesinde iyi ısı yalıtımını sağlayan, hafif, yeterli basınç dayanımına sahip, yangına ve depreme dayanıklı hafif beton grubuna giren bir yapı malzemesidir.

Gazbeton'un endüstrileşmiş üretiminde, genellikle silisli agrega olarak silisçe zengin olan kum, kuvarsit veya uçucu kül, gözenek oluşturucu olarak ise alüminyum tozu veya macunu kullanılmaktadır (Kömürlü, Önel 2007). Gazbetonun sembolik görünümü Resim 2.1'de verilmiştir (İnt. Kyn. 3).



Resim 2.1 Gazbetonun sembolik görünümü (İnt. Kyn. 3)

Bünyesi yapay olarak hava habbeleri ile hafifletilmiş bu beton, 0,5 ile 1,5 mm arası yuvarlak birbirleri ile bağlantısı olmayan hava gözeneklerinden oluşur. G25 sınıfı malzemede gözenek hacmi %80, katı madde hacmi %20'dir. Bu özelliği gazbetona yüksek ısı geçirmezlik kabiliyeti kazandırır. Katı madde miktarı gözenek oranı, birim ağırlığı ve mukavemeti etkiler. Üretim sırasında bu oran kabartıcı madde miktarı ile ayarlanır.

Buhar k  r   sonucu malzeme hacim sabitliğine erişmiş olarak ortaya çıkar. Gözeneklerin arasında irtibat kanallarının olmaması kapiler su emmenin az olmasını sağlar. Yüzeyde gözlenen su emme, kesim yüzeylerinde gözenekli yapının kesim sırasında tahrib olduğundan y  zeyssel su emmedir ve malzeme derinliğine su nüfus edememektedir (Özışık 2000).

Gözenekli betonlar genellikle; serbest drenajın gerekli olduğu veya daha az kütle ve ısıl geçirgenliği gerektiği yapılarda kullanılır (EM 1110-2-2000, 1994).

2.2.1 Gazbeton   retimi

Gazbeton   retiminde; kum, kireç,   imento, alçıtaşı, su ve genleştirici bir madde kullanılır ki böylece üretilen betonda boşluklu bir yapı oluşması sağlanmış olur. Genleştirici olarak alüminyum tozu kullanılır. Hammaddelerin her birinin ölçülmüş miktarlarının karıştırılmasıyla başlar. Bu karışımın kalıplara dökülmesiyle birçok kimyasal reaksiyon meydana gelir. Alüminyum tozu, kalsiyum hidroksit ve suyla reaksiyona girerek hidrojen çıkısına sebep olur ve bu hidrojen çıkışı sulu beton içinde baloncuklar oluşturarak hacminin artmasını sağlar ve böylece beton kabarak boşluklu bir yapı kazanır (Wikipedia Encyclopedia, 2005).

Karıştırma işleminden sonra oluşan sulu   imento Resim 2.2'deki gibi kalıpların sadece 2/3'   dolduracak biçimde dökülür ve kabarması beklenir.



Resim 2.2 Sulu kıvamda gazbeton harcı kalıbın 2/3'ü dolacak biçimde dökülür (kabarma oluşmadan önce).

Yaklaşık 30 dakika içinde gelişen reaksiyonlar sonucu açığa çıkan hidrojenin oluşturduğu baloncuklar sonucu kabaran, kısmen katılaşmış gazbeton bloğu oluşur (Resim 2.3).



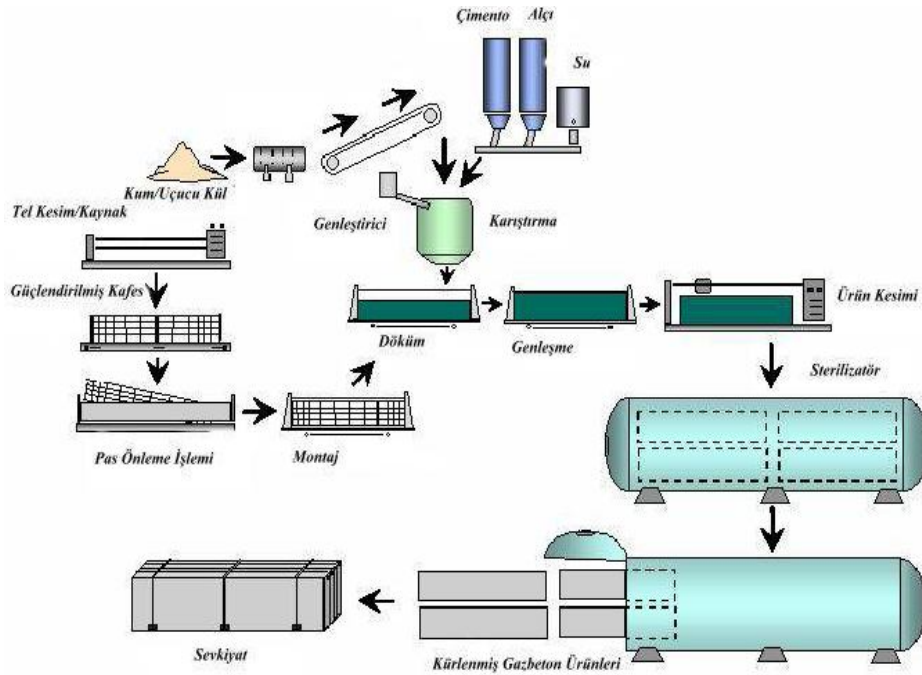
Resim 2.3 Akıcı kıvamda gazbeton harcının kabarmasıyla kalıbı doldurması.

Son adım kesilen blokların buhar kürüne alınmasıdır. Kesilen malzeme otoklavlarda doymuş buhar ile 12 bar basınç ve 190 °C sıcaklıkta yaklaşık 10 – 12 saat doymuş buhar

kürüne tabi tutulur. Buhar küründen çıkan ürünler, hafif, gözenekli ve yüksek basınca dayanım özelliğine sahip olur. Gazbeton üretim şeması Şekil 2.1’de verilmiştir.

Priz esnasında uygulanan işleme göre gazbetonlar üç sınıfta üretilir;

- a- Basınçlı buharda priz yapan gazbeton.
- b- Yüksek ısıda ve buhar altında priz yapan gazbeton
- c- Açık havada priz yapan gazbeton (Ünverdi 2006).



Şekil 2.1 Gazbeton üretim şeması (Ünverdi 2006)

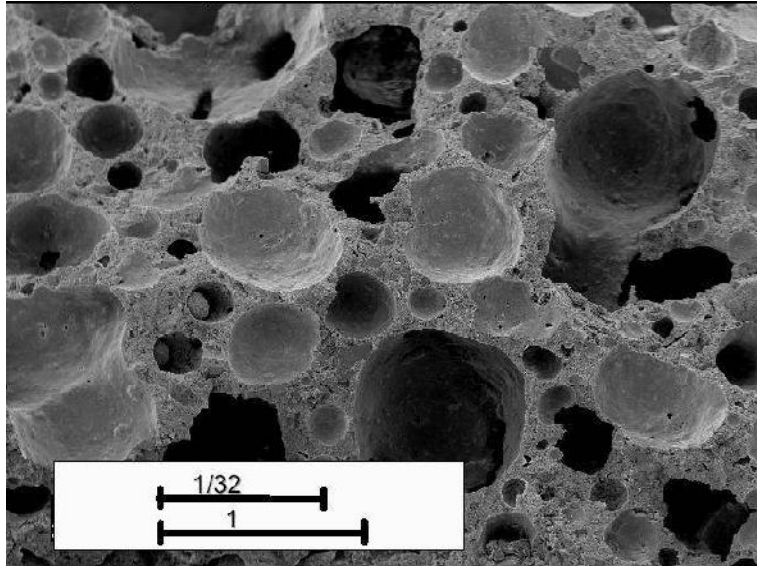
2.2.2 Gazbetonun Özellikleri

2.2.2.1 Gazbetonun Fiziksel Özellikleri

Malzeme içyapısı, rengi ve yüzey yapısı: Gazbeton malzemenin yapısında 0,5- 1,5 mm arasında küresel makro gözenekler vardır. Bu makro gözenekler mikro gözeneklerce çevrelenmiştir. Gazbeton, kullanılan silisli hammaddenin cinsine bağlı olarak beyaz, gri veya pembe renklerde olabilir. Yaygın olarak kuvarsit kullanıldığından renk genellikle beyazdır. Kesme makinelerinde kullanılan çelik tellerin özelliğine bağlı olarak imalat yüzeyleri düz veya çizgili- pürüzlü olabilir (Borhan 1987).

Gazbetondaki gözenek oluşumu metodu, mikro yapısına tesir eder ve bu da gazbetonun özelliklerini etkiler. Gazbetonun içsel yapısı; katı mikro gözenek matrisi ve makro gözenekler olarak tanımlanabilir. Makro gözenekler maddenin içinde sürüklenen hava kabarcıklarından etkilenen kütsel genişmeden meydana gelmektedir ve mikro gözenekler ise bu makro gözenekler arasındaki duvarlarda olmaktadır. Makro gözenekler çapları 60 µm'den daha büyük boşluklar olarak tanımlanabilir. Bu boşluklar ve boşlukların boyutları ve dağılımı betonun dayanım, geçirgenlik ve rötre gibi fiziksel özelliklerinde belirleyicidir. Genleşme sürecinde Resim 2.4'teki gibi ürün içinde milyonlarca hava gözeneği oluşmaktadır (Ünverdi 2006).

Resim 2.4 Genleşme sürecinde ürün içinde milyonlarca hava gözeneği oluşur
(Ünverdi 2006)



Özgöl ağırlığı: Gazbeton malzemenin ortalama boşluksuz özgöl ağırlığı 2,60 kg/dm³'dür.

Porozite: Gazbetonun porozitesi kuru birim hacim ağırlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Çizelge 2.5'de çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite (kapalı gözenek) değerleri verilmiştir (Borhan 1987, TS 3234 1978).

Çizelge 2.5 Gazbetonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri (Borhan 1987, TS 3234 1978)

Birim Hacim Ağırlığı kg/m ³	Porozite %
310- 400	85- 88
410- 500	81- 85
510- 600	77- 81
610- 700	73- 77
710- 800	69- 73

Isı iletkenlik: Gazbetonun %80'ini oluşturan mikro ve makro gözenekler, malzemeye düşük bir ısı iletkenlik değeri sağlamaktadır. Isı iletkenlik katsayısı, malzemenin kuru birim hacim ağırlığı ve nem içeriğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Kuru gazbetonun ısı iletkenlik değeri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Kuru gazbetonun ısı iletkenlik değerleri (Borhan 1987, Gündüz 1998)

Kuru Birim Hacim Ağırlığı kg/m ³	Isı İletkenlik Değeri W/Mk
300	0,08
400	0,09
500	0,12
600	0,14
700	0,16
800	0,19

Isıl genleşme: Gazbetonun ısı genleşme katsayısı, 20- 100°C arasında 0,008 mm/m°C'dir.

Özgül ısı: Bir maddenin birim kütlesinin sıcaklığını birim derece arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi miktarıdır (İnt. Kyn. 6). Özgül ısı katsayısı, malzemenin ağırlıkça %2- 5 denge neme sahip olduğu durumda 0,24- 0,26 Kcal/kg °C'dir.

Erime noktası: Gazbeton, 1000 °C civarında sinterleşmeye (camsılaşmaya), 1100- 1200 °C civarında da erimeye başlamaktadır.

Rötre: Gazbeton, bünyesindeki nem miktarı azaldıkça hacim kaybetmekte, arttıkça da hacim kazanmaktadır. Bu değişim, 4x4x16 cm'lik dikdörtgen prizma örneklerle tespit edilir. TS 453, ağırlıkça % 3,5 ve % 20 arasındaki nem durumunda, hacim değişmesini 0,5 mm/m olarak sınırlandırılmıştır. Üretilen örneklerde bu değer 0,15 mm/m' ye kadar düşebildiği belirtilmektedir.

Denge nemi: Yapı malzemeleri, başlangıçta içerdikleri üretim, nakliye ve inşaat nemini zaman içinde atarak, belli bir sabit nem derecesine gelirler. Denge nemi adı verilen bu durum, gazbetonun kuru birim ağırlığına ve ortamın bağıl hava nemine bağlı olarak küçük farklılıklar gösterir (Karagüler 1988).

Su emme-kuruma: Yapay taş malzemelerin su emmesinin başlıca nedeni (üretim hataları dikkate alınmazsa), üretim suyunun açığa çıkan kısmının bünyeden atılırken oluşturduğu kılcal yapıdır. Üretim sırasında karışıma verilen suyun pek az miktarda kimyasal bağlantı ile bünyede kalmakta, serbest kalan diğer kısım buharlaşma yolu ile bünyeden atılmaktadır. Atılan su miktarı gazbetonda % 50 civarında olmaktadır. Bu arada bir diğer önemli nokta da, bu suyun bünyeden atılış hızıdır. Kuruma ne kadar hızlı olursa, bünyede oluşan kılcal yapı da o kadar gelişmiş olacaktır. Gazbeton üretiminde açığa çıkan suyun az olması, üretim sırasında kurutma ve pişirme işlemi olmayıp, tersine yoğun su buharında kimyasal sertleştirme işlemi olmasından ileri gelmektedir. Bunun sonucunda zayıf bir kılcal yapı oluşmakta ve suyun hareketi gözenekler dolayısıyla engellenmektedir.

Suya doymuş duruma gelen yapı malzemesinin içerdiği nem miktarı, o malzemenin su kapasitesini belirlemektedir. Yapı malzemelerinde su kapasitesini belirlemektedir. Yapı malzemelerinde su kapasitesi toplam boşluk miktarına yaklaştığı oranda, malzeme donmaya karşı hassas duruma gelmekte, ayrıca nemin etkisi ile ısı yalıtım özelliğini kaybetmektedir. Gazbeton malzemenin, suya doymuş durumda dahi, bünyesindeki boşlukların yaklaşık % 60'ının kuru kaldığı belirtilmektedir.

Buhar geçirgenlik: Gazbeton, gözenekli yapısı sayesinde düşük bir buhar geçirgenlik direncine ($\mu=5-7$) sahiptir. Bu özellik, malzemenin yapıda rahatlıkla nefes almasını sağlamaktadır. Ancak, özellikle don bölgelerinde gazbeton duvar çıplak (korumasız)

bırakıldığı durumlarda, bu özelliğin malzemenin bünyesine büyük zarar verebildiği gözlemlenmiştir (İnt. Kyn. 5, Büyükçulha 1987).

Dona karşı dayanıklılık: Malzemenin nem miktarına bağlıdır. Normal şartlarda, suya doymuş gazbeton malzemenin erişebileceği en yüksek nem miktarının hacimce % 30-35 civarında olduğu belirtilmektedir. Gazbetonun bünyesindeki toplam boşluk miktarının hacimce %70-85 olduğu göz önüne alınırsa, malzeme bünyesinde buz kristallerinin genleşebileceği kuru bir hacmin bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, malzemeye dona karşı dayanım sağlamaktadır.

Bunun yanında, özellikle şiddetli bir yağış sonrasında ani bir don durumunda, malzemenin keskin kenar, köşe ve profillerinde suya doymuş durum oluşarak kritik nem miktarı aşılabileceğinden, bu bölgelerde don hasar yapabilmektedir. Kış aylarında, yapıdaki malzemenin bir yüzey kaplaması ile korunması bu sorun ile ilgili iyi bir çözüm olabilmektedir.

Ateşe karşı dayanım: Gazbetonun yanmadığı kabul edilmektedir. Malzeme bünyesinde 225- 450 °C arasında basınç mukavemetine etki etmeyen kılcal çatlaklar oluşmaktadır. 500 °C'den sonra çatlak sayısında sıcaklığa doğru orantılı olarak artış gözükmektedir. Basınç mukavemeti, 400 °C civarında bir zirveden geçtikten sonra, 740 °C civarında başlangıç mukavemetine eşit bir düzeye gelmektedir. Bu noktadan sonra ise, mukavemet büyük bir hızla düşmekte, bu da gerçek sinterleşme başlangıcı anlamına gelmektedir. Benzer durum hacim değişimlerinde de görülmektedir. 300 °C sıcaklığa kadar az bir hacim değişmesi olmakta, bu değer 740 °C sıcaklığa kadar sabit kalmakta, bundan sonra ise büyük değerlere ulaşmaktadır. Önceden de belirtildiği üzere malzeme, 1000 °C civarında sinterleşmeye, 1100- 1200 °C arasında da erimeye başlamaktadır (Budwell International Ltd 2004, Narayanan 2000).

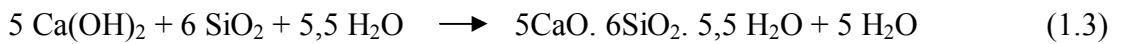
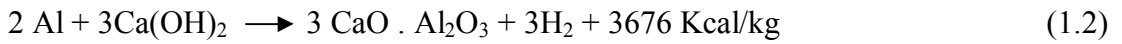
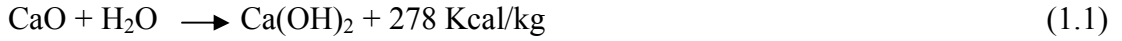
Ses yalıtımı: Yapılan araştırmalar, gazbeton malzemelerin yüksek gözenekli bir yapıya sahip olmasından ve bu gözeneklerde ses enerjisinin kolaylıkla ısı enerjisine dönüşebilmesinden dolayı, birim alan ağırlıklarına göre ortalama ses yalıtım değerinin, gazbeton malzemelerde diğer bazı yapı malzemelerine göre 2 Db daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Ses yutma: Malzeme yüzeyine çarpan ses enerjisinin bir kısmı yapı elemanının malzeme cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak yutulmakta, kalanı ise yansıtılmaktadır. Yutulan ses enerjisinin yüzeye gelen ses enerjisine oranı, ses yutma katsayısı olarak ifade edilmektedir. Katsayının 1'e yaklaşması ile malzemenin ses yutma özelliği artmakta, 1 olduğunda tüm gelen ses enerjisi yutulmaktadır. Gazbeton, gözenekli yüzeyi ve yüksek porozitesi nedeniyle ses yutma özelliği bakımından iyi bir malzemedir. Frekansın 125- 4000 Hz arasındaki değişimde, gazbeton 1,10- 0,27 arasında bir ses yutma katsayısına sahip olmaktadır (İnt. Kyn. 4, İnt. Kyn. 6, Çiçek 2002).

2.2.2.2 Gazbetonun Kimyasal Özellikleri

Gazbeton için, X ışınları kırınımı (XRD) çalışmaları göstermiştir ki; ana tepkime ürünü kalsiyum silika hidrat (C-S-H) grubuna aittir. Hidratasyon ürünü bir arada bulunan kristaller karışımı, yarı-kristaller ve amorf tobermorittir. Hidrate fazda oluşan yalnızca kalsiyum silikadır (Ünverdi 2006).

Gazbetonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Çiçek 2002):



Kimyasal etkenlere karşı direnç: Gazbeton, silika hidratlardan oluşan alkali bir yapıya sahiptir. pH değeri 9,5- 11,0 arasında değişir. Bu bakımdan asidik ortamlardan olumsuz yönde etkilenir. Sülfirik asit, hidroklorid asit, asetik asit malzeme yapısını, kloridler, sülfatlar ve nitratlar ise donatıyı hasara uğratırlar. Bu bakımdan da gazbeton, deniz suyuna karşı korunmalıdır. Ortamda yoğun ve devamlı kimyasal agresif maddelerin bulunması halinde, gazbeton malzeme, bu maddelere dayanıklı yüzey kaplamaları ile korunmalıdır.

Suda çözülme: Gazbetonun mukavemetini sağlayan hidro silikatlar suda çözülmezler. Ancak üretime giren diğer maddeler (kum, kireç, çimento veya su) suda çözülebilen

tuzlar içerirlerse, ortam şartlarına göre bu tuzlar malzeme yüzeyinde kristalleşerek çiçeklenme yaratabilirler. Çiçeklenme, öncelikle eriyik tuz miktarına bağlı olmayıp gazbeton bünyesindeki kılcal su hareketinin hızına ve yüzeydeki kuruma hızına bağlıdır (Çiçek 2002).

2.2.2.3 Gazbetonun Mekanik Özellikleri

Gazbetonun basınç dayanımına etki eden faktörler arasında şekil ve boyut, boşluk oluşturma yöntemi, yükleme yönü, beton yaşı, su muhtevası, kürlenme yöntemi gelir. Hava gözeneklerinin gözenek yapısı, gözenek kabuklarının mekanik durumu basınç dayanımını doğrudan etkiler. Genellikle basınç dayanımı yoğunluk artışıyla lineer olarak artar. Bunun sebebi, gözeneklerin azalması sonucu yoğunluğun artmasıdır.

Gazbetonun elastisite modülü, basınç raporlarında, basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak formüle edilir (Ünverdi 2006). Ticari bir gazbetonun mekanik özellikleri Çizelge 2.7'deki gibidir (İnt. Kyn. 6).

Çizelge 2.7 Ticari bir gazbetonun mekanik özellikleri (İnt. Kyn. 6)

Malzeme mukavemet sınıfı	G2		G3		G4	
Ortalama basınç dayanımı (kgf/cm ²)	25		35		50	
En yüksek kuru birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	400	500		600		700
Isı iletkenliği (W/mK)	0,15	0,17		0,20		0,23
Elastisite modülü (kgf/cm ²)	12500	17500		22500		27500

Pratikte gazbetonun yangına dayanıklılığı sıradan betonlardan daha iyidir ya da en az sıradan betonlar kadardır ve yangına maruz kaldığında alevler gazbetonu kuşatamaz. Bu davranışın önemli bir sebebi bu malzemenin sıradan betona göre daha homojen

olmasıdır, bu sebeple sıradan betondaki kaba agreganın farklı oranlarda genleşme, çatlama ve parçalanmalara öncülük etmesidir. Radyasyon içinden, geçilen sıcaklık transferi, hava-katı yüzeylerin sayısının ters bir fonksiyonu olduğu için gazbetonun yangına dayanıklılık özelliği, kapalı gözenekli yapısının büyük boşluklarının olduğu kısımlarda gerçekleşir. Bununla birlikte düşük termik geçirgenliği ve yayması gazbetonun yangına daha iyi dayanıklılık özelliklerine sahip olmasını sağlar.

Gazbeton inorganik olmasından dolayı yanmaz, erime noktası 1600 °C’dir ki bu değer tipik bir şekilde yanan bir binanın içindeki sıcaklık olan 650 °C’nin 2 katından daha fazladır (İnt. Kyn. 6).

Basınç mukavemeti: Gazbeton basınç mukavemeti, kuru birim hacim ağırlığına ve içerdiği nem miktarına bağlıdır. Çizelge 2.8’de belirtildiği gibi TS 453’e göre gazbeton malzemelerin basınç mukavemeti küp deneyine göre belirlenir. Bu deneyde, malzemenin basınç mukavemeti 15x15x15 cm boyutlarındaki küplerin ağırlıkça %10 neme erişinceye kadar kurummasının ardından kırılması ile bulunur. Gazbeton, içerdiği nem oranında mukavemet kaybetmektedir. Bu değişim, tam kuru malzeme ile suya doymuş malzeme arasında %35 derecesindedir.

Çizelge 2.8 Gözenekli beton yapı malzeme ve elemanlarının sınıfları (TS 453, 1988)

Sınıfı	En Büyük Basınç Dayanımı kgf/cm ² (MPa)	En Küçük Basınç Dayanımı kgf/cm ² (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Ortalama Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Sınıf İşareti
G1	15 (1,5)	10 (1,0)	400	310- 400	G1/0,4
			500	410- 500	G1/0,5
G2	25 (2,5)	20 (2,0)	400	310- 400	G2/0,4
			500	410- 500	G2/0,5
G3	35 (3,5)	30 (3,0)	500	410- 500	G3/0,5
			600	510- 600	G3/0,6
G4	50 (5,0)	40 (4,0)	600	510- 600	G4/0,6
			700	610- 700	G4/0,7
G6	75 (7,5)	60 (6,0)	700	610- 700	G6/0,7
			800	710- 800	G6/0,8

Elastisite modülü: Gazbetonun elastisite modülü, kuru birim hacim ağırlığına ve küp mukavemetine bağlı olarak değişmektedir.

Çekme mukavemeti: Gazbetonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin yaklaşık 1/6'sı, yani 2- 12 kg/cm² arasında değişmektedir.

Eğilme-çekme mukavemeti: Gazbetonun eğilme-çekme mukavemeti, basınç mukavemetinin 1/5'i, yani 3- 15 kg/cm² arasında değişmektedir.

Sünme: Devamlı yük altında gazbeton sünme yapmaktadır. Yapılan araştırmalar, izin verilen yük sınırları içinde gazbetonun sünmesinin, ağır betondan daha az olduğunu ortaya koymuştur. Bunun nedeni, gazbetonun otoklav çıkışında kimyasal bağlantılarını tamamlamış olması, buna karşılık ağır betonun yük altında kristal değişimine uğramasının yanında, uzun süre bünyesinde kimyasal değişimin devam etmesidir (Çiçek 2002, İnt. Kyn. 7).

2.2.3 Gazbetonun Sağladığı Yararlar

Gazbeton ürünlerin diğer benzer duvar malzemelerine göre bazı avantajları bu bölümde verilmiştir.

2.2.3.1 Tasarımda Sağladığı Yararlar

Projelendirmede kolaylık sağlaması: Gazbetonun standart boyutlarda üretilmesi sonucunda projelendirme esnasında modüler tasarıma imkân tanıdığından gazbeton tasarımda daha baştan kolaylık sağlamaktadır.

Dış duvar kalınlıklarının azalması: Gazbeton çeşitli boyutlarda üretilip, yalıtım özelliğinden dolayı dış duvar kalınlıklarını azaltacağından iç mekan kullanım alanlarına 100 m² de 4- 5 m² alan kazandırmaktadır.

Bina taşıyıcılarının incelenmesi: Gazbeton yapı ürünleri hafif olduğundan binanın taşıyıcılarına gelen yükü azaltır ve dolayısı ile bina taşıyıcıları tasarımda daha ince olarak tasarlanır ve böylece iç mekanların ve bina dış cephesinin tasarımında kolaylık sağlanır (İnt. Kyn. 5, Kömürlü ve Önel 2007).

2.2.3.2 Yapımda Sağladığı Yararlar

Malzemenin kolay işlenebilirliği, çabuk ve rasyonel yapım açısından çok önemli bir yarardır. Ayrıca, basit ve açık konstrüksiyonlara ve planlama ve şantiye esnasındaki düşük maliyetlere yol açan yapı malzemesinin üniversallığı önemli bir yarardır. Gazbeton yapı sistemi ayrıca, yapım süreçlerini de hissedilebilir bir şekilde kısaltmaktadır. Bu da sonuçta daha az bir yatırım maliyeti demektir. Gazbeton bloklar ile duvar örmek veya gazbeton paneller ile duvar oluşturmak ve duvarın üzerinde farklı malzeme ve yöntemler ile sıva ve benzeri işlemleri gerçekleştirmek son derece kolaydır. Bu işlemler nitelikli elemanlara ihtiyaç göstermez, diğer duvar malzemelerine kıyasla daha az işçilik gerektirir, sonuç olarak da yapımda sıva ve işçilik maliyeti önemli ölçüde düşer. Böylece yapım maliyet ve süresi önemli ölçüde azalmış olur. Bu noktaların göz önüne alındığında gazbeton yapı ürünlerinin kullanımı hem rasyonel, hem de ekonomiktir. Bunun ötesinde sağlanan yararlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Balanlı 1997).

Gelişmiş bir teknoloji ile üretilen gazbetonun ölçüleri milimetrik hassasiyettedir. Bunun nedeni üretim tesislerinde uygulanan son derece gelişmiş kesim teknolojisidir. Bu da temiz ve hassas, üst yüzeyleri düzgün olan yapı elemanlı bir yapı konstrüksiyonuna imkan sağlamaktadır. Sonuç olarak çeşitli duvar örgü malzemelerine kıyasla gazbeton bloklar çok daha az emek ile düzgün yüzeylere sahip duvarların elde edilmesini sağlamaktadır. Düzgün yüzeyli duvarlar sıvayı kolayca kabul ederek sıva işçilik ve malzemesinden tasarruf sağlamaktadır. Blok yüzeylerinin düzgün ve boyutların hassas olması harç yerine örgü tutkalı kullanılmasına olanak vermekte böylece duvarlar daha hızlı örülebilmekte ve ısı köprüleri ortadan kalkmaktadır. Büyük yüzeyli gazbeton yapı elemanlarındaki ölçü hassasiyeti montajı rasyonelleştirmektedir. Yapı malzemesinin

hafifliği, ayrıca duvar büyüklüğünde yapı elemanlarına ulaşan yapı elemanı formatına imkan kılmaktadır. Gazbeton yapı bloklarının sadece 8 tanesi ile 1m² duvarın örüldüğü göz önüne alındığında sağlanan işçilik tasarrufu ve yapım hızı daha iyi anlaşılmaktadır. Yığma sistemde betonarme döşeme yerine, gazbeton panellerle döşeme yapımı, hem maliyet hem de yapım süresi yönlerinden avantajlı olduğu gibi kalıpla da uğraşılmayacaktır (Hasol 1967, Okan 1978).

Gazbeton ürünleri nakledilebilir birimlerde toparlanmıştır. Ağırlığın ve nakil birimlerinin uygunluğu, nakil kapasitesinin tam kullanılmasını sağlamaktadır. Örneğin; gazbeton duvar blokları taşımaya uygun bir biçimde paketlenmişlerdir. Malzemenin yoğunluğu taşıt kapasitesinden tam olarak yararlanma olanağı vermektedir. Gazbeton yapı ürünleri betondan 6, tuğladan 3 kez daha hafif olduğundan nakliyeden tasarruf sağlar. Yani gazbeton yapı ürünlerinin taşınması hem kolay hem ekonomiktir (Bilgin 1994).

Yukarıda sayılan sebeplerden dolayı (malzemenin rasyonel olması ve kolay işlenebilmesi ve kolay montaj olanağı sayesinde) gazbeton yapı malzemeler yapı üretiminde hız sağlamaktadırlar. Gazbeton konut sistemi ile yapı üretimi büyük sürat kazanmakta, zamandan tasarruf edilmekte ve hava şartlarına bağılı kalınmadan, hemen hemen her mevsimde yapı inşa edilebilmektedir. Ayrıca malzemenin standartların öngördüğü bütün özellikleri (standart boyutlar, basınç dayanımı, ısı ve ses yalıtımı özellikleri vb.) bünyesinde barındırıyor olması ile de yapı üretimine ve dolayısıyla yapıya kalite katmaktadır (Kömürlü ve Önel 2007).

2.2.3.3 Yapıda Sağladığı Yararlar

Geniş kapsamlı özellikleri olan bir yapı malzemesi: Gazbeton dengeli özelliklere sahip bir yapı malzemesidir. Birden fazla yapı malzemesinin birlikte kullanılması ile ulaşılabilecek pek çok olumlu özelliğı tek başına bünyesinde toplamıştır, çok işlevlilik özelliğine sahiptir. Bu durum deneyler, araştırma sonuçları ile dünyada ve ülkemizde elde edilen deneyimler ile doğrulanmıştır.

Hafif olmasına rağmen yine de masif bir yapı malzemesi: Gazbeton masif yapı malzemeleri arasında hafif ağırlıklı bir malzemedir. Gazbeton yapı elemanı milyonlarca küçük hava boşluklarına rağmen masiftir. Ağırlığın düşük olması, nakliye ve uygulamada iyi yararlar sağladığı gibi statik açıdan da malzeme ve yük tasarrufunda oldukça ekonomik konstrüksiyona izin vermektedir. Endüstriyel yapılarda olduğu gibi sosyal ve konut amaçlı yapılarda da daha hafif taşıma konstrüksiyonları ve daha küçük temel boyutları elde edilebilmektedir (İnt. Kyn 4).

Yüksek basınç dayanımı: Gazbeton montaj elemanları ve blokları TS 453 ile tanımlanan değişik dayanım sınıflarında üretilmektedir. Bunlar: G1, G2, G3, G4 ve G6'dır. G1 sınıfında 15 kg/cm² olan basınç dayanımı G6 sınıfında 75 kg/cm² ye kadar çıkmaktadır. Gazbeton basınç dayanımı, yoğunluk ve ısı yalıtkanlığı özelliklerinin optimum düzeyde dengelendiği bir malzemedir.

Çok uygun ısı yalıtım özelliklerine sahip masif bir yapı malzemesi: Bünyesinde yer alan küçük gözenekler içinde hapsedilmiş hava nedeni ile gazbeton etkin ısı yalıtım özelliği gösterir, bu da oldukça düşük bir k-değeri sağlamaktadır. Isı yalıtımına ilişkin yönetmelik ve standartların tüm isteklerini ek bir ısı yalıtım malzemesine gerek kalmadan gazbeton tek başına sağlamaktadır. Böylece pek çok yapı fiziki sorunu da ortadan kalkmış olur.

Dengeli ısı depolama özelliği: Gazbeton yapı fiziki açısından diğer bir üstünlüğü ise ısı depolama özelliğidir. Dış duvarlarda kullanılan gazbeton, yapıyı dışarıda oluşan ısı farklılaşmalarından koruyarak yapı içinde sağlıklı ve konforlu bir ortam oluşmasını sağlamaktadır (İnt. Kyn. 5).

Örnek olabilecek difüzyon davranışı: Yapılarda sağlıklı ve konforlu mekanların oluşturulabilmesi için duvar bileşenlerinin ısı yalıtım ve ısı depolama özelliklerinin yanı sıra difüzyon davranışları da oldukça önemlidir. Gazbeton, difüzyona açık özelliği ile çevrelediği ortamın nem dengesinin kurulmasına yardımcı olur. Gazbeton ürünlerindeki milyonlarca gözenek, yapının nefes almasını sağlayarak rutubetlenmeyi önler, konfor düzeyini artırır, dolayısı ile sağlıklı iç mekânlar yaratır.

Gazbeton yapı elemanlarının yangından koruma özellikleri idealdir: Gazbeton gözenekli beton yanmayan bir yapı malzemesidir. Gazbeton yapı elemanları uygulamaya göre her yangın direnç sınıfına uyabilmektedir. İnorganik yapısı sayesinde Gazbeton yapı malzemeleri A1 sınıfı yanmaz malzeme grubundadır. Böylece 1200 °C' ye ulaşan sıcaklığa dayanır. Bu özelliğiyle yapılarda yangın güvenliği sağlar.

Şekil, hacim stabilitesi: Aşırı koşullar altında bile gazbeton ürünlerde önemli hacim değişikliklerine rastlanmaz yani gazbeton yapı elemanları stabildir. Yapılan deneyler ısıya bağlı uzama ve kısalma miktarlarının standartların öngördüğü miktarların altında olduğunu göstermektedir.

Düşük su emme: Gazbeton yapı malzemesinin strüktüründeki, dokusundaki kapalı gözenekler sayesinde gazbeton yapı elemanlarının su emmesi, kılcal damarlı strüktürü olan yapı malzemelerine nazaran çok daha yavaş gerçekleşmektedir. Gazbeton yapı elemanlarının denge rutubeti hacimsel olarak %1,5- 2 arasındadır (% 40-%50 gibi nisbi bir rutubette). Gazbeton duvar konstrüksiyonlarını hava etkilerinden korumak için, büyük boyutlu, donatılı yapı elemanlarının kaplanmaları ve duvar bloklarının da sıvanmaları yeterli olmaktadır. Gazbeton çatı konstrüksiyonlarına bilinen kaplamalar uygulanır. Gazbeton mineral malzeme olarak çürüme göstermez.

Düşük don hassasiyeti: Gazbeton dona karşı hassas bir malzeme değildir. Rutubet içeriği belli bir ölçüyü aşmadıkça, kireç ve çimento bağlayıcılı gazbeton sıvasız olarak kullanıldığında bile dona karşı yeterli direnç göstermektedir. Yine de malzemelerin, özellikle ısı yalıtım niteliğinden yararlanabilmek için, içerisine su girmesi engellemelidir yani malzemenin nemlenmemesine dikkat edilmelidir.

İyi bir ses yalıtımı: Masif gazbeton yapı malzemesi birçok durumda geçerli olan ses yalıtım şartlarını, ek bir yalıtım gerektirmeden yerine getirmektedir (İnt. Kyn. 6).

Toksik Maddeler: Gazbetonun bünyesinde hiçbir toksik madde yoktur (Kömürlü ve Önel 2007).

Hafiftir-Depreme Dayanıklı: Gazbeton yapı malzeme elemanları betondan 6, tuğladan 3 kez daha hafif olması nedeniyle; nakliyeden, demir ve çimentodan önemli ölçüde tasarruf sağladığı gibi, yapı hafiflediği için deprem emniyeti artar, her türlü zemin şartlarında güvenlikle inşa edilebilir.

Çevreye karşı uyum: Gazbeton yapı malzemesi özellikle çevreye karşı uyumludur. Hammadde olarak doğada zengince bulunan kuvarz kumu, kireç, çimento ve su gözenek oluşumu için de ince taneli metalik alüminyum kullanılmaktadır. Üretimden dolayı, ortaya çıkan malzeme atıkları ya üretim dolaşımına geri dönecektir veya başka ürün şeklinde, örneğin granül tanecikleri olarak çıkmamaktadır. Gazbeton yapı malzemesi ve yapı elemanları gaz veya çevreyi tahrip eden maddeler çıkartmamaktadırlar. Gazbeton insanoğluna daha az yakıt harcayarak daha çok ısınabilme olanağı verdiği için, temiz havaya katkısı olan bir yapı malzemesidir (İnt. Kyn. 6, Kömürlü ve Önel 2007).

Kolay temizlenebilme, onarılabilme, bakım-onarım maliyeti: Gazbeton yapı malzemelerinin kullanımında bozulma, zedelenme az rastlanır bir olaydır. Üzeri kaplanmış veya sıvanmış gazbeton ürünlerde hiç yok denecek kadar azdır. O yüzden bakım onarım maliyeti pek yoktur. Ama yine de az da olsa gazbeton ürünlerinde bir bozulma olursa, ürünlerin standart olarak üretilmesi sonucu parçaların bir araya getirilmesi ile üretilen yapının herhangi bir ögesindeki bozuk parça alınıp yenisi takılır. Yani gazbeton yapı ürünleri kolay onarılabilir ve bakım-onarım maliyeti de düşük olur. Bu özellikleri sebebiyle, gazbeton yapı ürünlerinin toplu konut üretiminin amaçlarına çok uygun bir yapı ürünü olduğu görülmektedir. O nedenle gazbeton yapı ürünlerinin toplu konut üretiminde kullanımı sırasında projelendirme ile uygulama aşamalarının -bu makalede açıklanan- kurallarına göre yapıldığı takdirde amaçlanan hızlı, kaliteli ve ekonomik konutların üretildiği ve üretilebileceği görülmektedir (Kömürlü, Önel 2007).

2.3 Puzolanlar

Puzolanik maddeler, silissi veya alüminyum silikatlı veya bunların bileşiminden oluşan doğal maddelerdir. Puzolanik maddeler su ile karıştırıldığında kendi kendine

sertleşmezler fakat ince öğütüldüğünde ve suyun mevcudiyetinde normal çevre sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksitle ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dayanımı geliştiren kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri oluşturmak üzere reaksiyona girerler. Bu bileşikler, hidrolik maddelerin sertleşmesinde oluşan bileşiklerle benzerdir. Puzolanlar esasen reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3)’den oluşmuştur. Geri kalan kısım demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer oksitleri ihtiva eder. Sertleşme için reaktif kalsiyum oksit oranı ihmal edilebilir. Reaktif silisyum dioksit miktarı kütlece % 25’ten az olmamalıdır (İnt. Kyn. 8).

Puzolanik aktivite, çimentolu üretimlerde kalsiyum hidroksit ve puzolandaki aluminosilikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi olarak tanımlanır. Puzolanların aktivitesi hidratasyonun karmaşık özelliği ve puzolanların heterojen yapılarına rağmen tam bilinmemektedir.

Bununla beraber, aktiviteyi etkileyen önemli faktörler şunlardır:

- Puzolanların aktivitesi, “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” içeriği ve malzemedeki reaktif miktarı arttıkça artar.
- Kimyasal reaktiflik içinde, puzolanik materyal amorf fazda olmalıdır.
- Puzolanik tanecikler yeterli incelikte olmalıdır.

Puzolanlar için aktivite kısa dönemde yüzey alanlarına uzun dönemde ise kimyasal ve mineralojik bileşimine bağlıdır (Meral 2004).

Farklı puzolanlar bünyelerinde farklı oranlarda silis, alüminyum, kireç, demir oksit ihtiva ettiklerinden sabit bir kimyasal bileşim oranları yoktur. Puzolan olarak tanımlanan volkanik malzemeler TS 25 de “Tras” olarak adlandırılmıştır (Demir 2001).

Puzolanik aktivitenin belirlenmesi: Puzolanik aktivite, puzolanik malzemeyle yapılan deneyler sonucunda tayin edilmektedir. TS EN 450 nolu standarda göre, kütlece % 75 oranında referans çimento + % 25 oranında puzolan ile hazırlanmış karışımlar ile sadece referans çimento ile hazırlanan karışımlar üzerinde deneyler yapılarak puzolanların

aktivitesi belirlenir. Pozolanik aktivite, “dayanım aktivite indeksi” olarak adlandırılan bir değerin hesaplanmasıyla ifade edilir.

$$\text{Dayanım aktivite indeksi} = (A/B) \times 100 \quad (1.4)$$

Burada;

A: Pozolanlı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı,

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı (Demir vd. 2008).

Avrupa’da Romalılar İtalya’daki Roma ve Napoli arasında yer alan puzzuoli kasabası toprağından yararlandılar. Bu toprak camlaşmış volkan dağıydı ve pozolan sözcüğü bu kullanımdan kaynaklanmaktadır. Portland çimentosuna pozolan katıldığı zaman çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 (kireç) ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında meydana gelen reaksiyon sonunda pozolan bağlayıcılık özelliğini gösterebilir. Reaksiyonlar sonunda Ca(OH)_2 bağlanır, başka bir deyimle çözülmez bir duruma getirilir.

Bir pozolan bağladığı kireç miktarı ne kadar fazla ise pozolanik özelliği o kadar yüksektir. Pozolanik özellik kullanılan pozolanın özgül alanına bağlıdır. Demek ki bir malzemenin pozolanik özelliğini arttırmak için onu çok ince öğütmek gerekmektedir.

Pozolanlar (traslar) kimyasal olarak SiO_2 ve az miktarda Al_2O_3 ’den oluşan maddelerdir. Su ile karıştırıldıklarında çamur haline gelir. Kurutulduktan sonra tekrar eski hallerine geri dönerler. Bunlar (pozolanlar) kireçle karıştırılırsa suda çözünmeyen bir kalsiyum silikat tuzuna dönüşürler. SiO_2 içeren her toprağın pozolan olmayacağı açıktır. Hangi toprağın bu özellikte olduğu aktivite testi yapılarak belirlenir (Karaman vd. 2005).

ASTM C 618- 72 nolu standarda göre bir pozolan da $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0,70$ şartı gerçekleşmelidir. Diğer taraftan CaO miktarı da % 4’ü geçmemelidir. Amorf olması ve aktif olması gerekir. Bu nedenle kimyasal analiz sonuçları ile beraber mekanik deneylerle de maddenin pozolanik olup olmadığı kanıtlanmalıdır (ASTM C 618, 1998; TS EN 197-1, 2002).

Doğal puzolanlar da aranan kimyasal özellikler:

- $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ en az % 70 ve $\text{CaO} < \% 4$
- MgO en çok %5
- SO_3 en çok %3
- Rutubet en çok %10 olmalıdır (TS 25, 1975).

2.3.1 Puzolanların Sınıflandırılması

Doğal Puzolanlar

Volkanik Kökenli Doğal Puzolanlar

- Volkanik Camlar
- Volkanik Tüfler ve Tras

Isıl İşlem Görmüş Killer ve Diatomitler

- Killer ve Şeyler
- Diatomitler

Yapay Puzolanlar

- Uçucu Kül
- Silis Dumanı
- Yüksek Fırın Cürufu
- Pirinç Kabuğu Külü (İnt. Kyn. 8).

2.3.1.1 Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar, Diatomit hariç hemen hemen tamamı volkanik olaylar neticesinde meydana gelmiş malzemelerdir. Bunların önemlileri pomza taşı, volkanik cüruflar ve Diatomit olarak gösterilebilir.

Pomza Taşı

Boşluklu, süngerimsi, volkanik olaylar neticesinde oluşmuş, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı, gözenekli bir yapıya sahip volkanik bir kayadır. Pomza; rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması ile pratik olarak benzer volkanik camlı kayalardan ayrılmaktadır. Pomza'yı, oluşumuna göre iki gruba ayırabiliriz. Bunlar, asitik ve bazik pomzadır. Asitik pomza kirli beyaz görünümündedir. Özgöl ağırlığı 0.5- 1 g/cm³, sertliği mohs skalasına göre 5- 6 civarındadır. Bazik pomza koyu renklidir. Özgöl ağırlığı 1- 2 g/cm³ civarındadır. Su emme oranı %50'den daha fazladır. Porozitesi ise %75- 80 civarındadır (Gündüz vd. 1998, Serin 1999).

Pomza, inşaat sektöründe yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Ülkemizde üretilen pomzanın büyük bir bölümü inşaatlarda kullanılmaktadır. Kum ve çakıla göre daha düşük bir yoğunluğa sahiptir. Bu durumda pomza ile üretilen betonlar da hafif olmaktadır. Pomza betonunun normal betondan hafif olması nedeni ile zaman ve işçilikten tasarruf sağlanmaktadır. Ayrıca hafif olan pomza betonu nedeni ile temele iletilen yükler de azalacağından inşaat temel masraflarında da önemli ölçüde tasarruf sağlanabilmektedir. Isı geçirgenlik katsayısı normal betondan 6 kat daha fazla izolasyon sağlamak ve bu özelliğinden dolayı da büyük çapta ısı ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Aydın 1998, DPT 2001).

Volkanik Cürufklar

Bu tür malzemeler volkanik patlamalar neticesinde atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Patlama sırasındaki ani basınç düşüşü sıvı magma içerisinde çözünmüş olan gazların açığa çıkmasına sebep olur. Açığa çıkan gazların geride boşluklar bırakması nedeniyle katılaştıran parçacıklarda boşluklu bir yapı görülür. Katılaştıran parçacıkların ani soğumaya maruz kalması bu malzemelerde camlı yapı oluşmasına neden olur.

Düzensiz bir gözenek yapısına sahiptirler. Mekanik performansları oldukça düşüktür. Bu nedenle kullanım alanları sınırlıdır. Çimento sanayinde katkı ve traslı çimento imalinde ve hafif blok imalinde kullanılabilmektedir (Erdoğan vd. 2002).

Diyatomit

Diyatomit su yosunları sınıfından olan tek hücreli, mikroskopla görülebilecek kadar küçük olan diatomların silisli kavkılarının birikerek fosilleşmiş kavkılarından meydana gelen organik tortul kayadır (Meisenger 1985, Borat 1992). Diatomit, organik bir canlı olan diatom fosillerince şekillendiğinden, organik orijinli bir hammadde olarak da tanımlanabilir. Hafif ve boşlukludur. Rengi sarıya yakın gridir. Görünüş bakımından tebeşire ve kaoline benzer. Asit dökülünce köpürür ve bu suretle tebeşirden ayırt edilir. Hafif olması ve pürüzlü dokunumu ile de kaolinden ayrılır. Diatomit' in, günümüzden yaklaşık 5- 60 milyon yıl önce miyosen sonu ve pliyosen başlarında oluştuğu tahmin edilmektedir. Diatomit, yüksek gözenekliliğe sahiptir. Bu nedenle ağırlığının 3- 4 katına kadar su emebilir. Su ile karıştırıldığında yapışkan bir çamura haline gelmez. Sertliği, mohs cetveline göre 4- 6,5 civarındadır. Yani opalden daha az, pirinçten ise daha fazla serttir (Aruntaş vd. 1998, Serin 1999, Uygunoğlu 2005).

Diyatome kavkısı üzerindeki delik boyutları genellikle 0,037- 0,52 mikron arasında olup ortalama 0,25 mikron civarındadır. Bakteriyolojik analizde kullanılan normal membran filtrelerinde median delik çapı 0,45 mikron olup Diatomitin bünyesi membran filtrenin gözenekli haline benzemektedir. Bu delikler Diyatomite çok gözenekli elek gibi bir bünye temin etmektedir. En küçük bakteri 0,22 mikron, amipli dizanteri kisti 5- 25 mikron olduğuna göre Diatomit filtrasyonun, askıdaki katı maddelere ilaveten suda bulunan mikroorganizmaları da tesirli bir şekilde tutacağı aşıkardır. Kimyasal bileşim olarak yapısında %65- 90 arasında SiO_2 bulunur. Isı iletkenliği; 300°C'de 0,08, 800°C'de 0,10 ve 1200°C'de ise 0,11 kcal/m²h°C dir. Basınç dayanım değeri ise 3- 18 kgf/cm² arasında değişmektedir (Özbey ve Atamer 1987, Ünsal 2001).

2.3.1.2 Yapay Pozolanlar

Yapay pozolanlar, çoğunlukla çeşitli endüstri kuruluşlarının işlemiş oldukları maddelerin atıklarından oluşan malzemelerdir. Çimento ve beton endüstrisinde geniş kullanım alanı bulmaktadırlar. Önemli yapay pozolanlar aşağıda özetlenmiştir.

Silis Dumanı

Silis dumanı, silisyum metali üretiminde kullanılan fırınlarda, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür veya odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucunda oluşan çok ince taneli tozdur. Fırınlarda düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO_2 gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO_2 olarak yoğunlaşarak silis dumanının büyük bir kısmını meydana getirir. Endüstriyel bir atık olan silis dumanının değerlendirilmesi ile ilgili yapılan ilk çalışmalar 1950'li yıllarda Norveç'te başlamıştır. Çok ince taneli ve yüksek oranda amorf silis içeriği nedeni ile etkin bir pozolan olan bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı ilk olarak 1969 yılında denenmiştir. Silis dumanının betonun birçok özelliği üzerindeki olumlu etkilerinin ortaya çıkması ile bu alandaki çalışmalar son yıllarda hızla yoğunluk kazanmıştır.

Silis dumanı, katkılı çimento ve betonlarda yüksek dayanım isteyen yerlerde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örnek olarak; yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları, yüksek dayanımlı hafif beton elemanlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir.

Silis dumanı, genellikle gri rengin farklı tonlarında bulunmaktadır. Özgül ağırlığı ortalama $2,20 \text{ g/cm}^3$ civarındadır. Gevşek birim ağırlığı $130-430 \text{ kg/m}^3$ arasında, sıkıştırılmış birim ağırlığı ise ortalama 550 kg/m^3 civarındadır (Yeğinobalı 2002).

Endüstriyel Cüruflar

Cüruflar, çeşitli metalurji tesislerinden açığa çıkan atık maddeler olarak adlandırılabilir. Demir cürufu, kurşun-çinko cürufu, nikel cürufu, bakır cürufu ve fosfor cürufu gibi çeşitleri bulunmaktadır. Tüm cüruflar arasında en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır.

Demir cevherleri, içerdikleri demir oksit bileşenlerinin yanı sıra silis, alümin, kükürt, fosfor gibi maddelerle bir arada bulunmaktadır. Cevher içerisindeki demir oksitten demir elde edebilmek için cevher, yüksek fırınlarda kok kömürü ve arıtma işleminde yardımcı madde olarak kullanılan kalker taşı ile birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutulurlar. Demir oksitteki oksijen, kok kömürünün karbonuyla birleşerek karbon monoksit ve karbondioksit olarak cevherden ayrılır. Geride eriyik durumda demir ile birlikte kireç, kok kömürü külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan “cüruf” adı verilen maddeler topluluğu kalır. Eriyiğin üst kısmında yer alan cüruf, buradan yan ürün olarak dışarı çıkartılarak geride sadece demirin kalması sağlanır (Serin 1999).

Cürufların çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Özellikle konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılabilirler. Bununla birlikte, modern teknolojiyle çelik üretimi yapılan tesislerde üretilen camsı yapıdaki cürufları da çimentolu sistemlerde kullanmak mümkündür.

Yüksek fırın cürufları tek başlarına bağlayıcı özellik göstermezler. Bu malzemeler bağlayıcılık özelliğini kireç veya çimento ile beraber oldukları zaman kazanırlar. Bu bakımdan puzolanlarla önemli bir benzerlikleri vardır. Yüksek fırın cürufları çimento yapısına sahiptirler ve ancak kireçle karşılaştıkları zaman hidrasyon yapabilmektedirler. Kireç veya çimento bir katalizör işlevini görerek hidrasyonu başlatmakta ve bu başlayan hidrasyon da kendiliğinden devam etmektedir (Postacıoğlu 1986).

Pişmiş Kil

Yapay puzolan olarak bilinen maddelerden biri de pişmiş kil'dir. Bu amaçla kil 600-900°C arasında pişirilir ve elde edilen madde çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimentoya belirli oranlarda karıştırılarak kullanılır. Tuğla ve kiremit tozunun bir bağlayıcı madde ile karıştırılması da aynı sonucu verir. Ülkemizde eski eserlerin, kışlaların, köprülerin yapımında tuğla tozu ve kireç karışımından oluşan Horasan denilen bu bağlayıcı madde oldukça geniş ölçüde kullanılmıştır. Bu bağlayıcı madde özellikle su karşısında çözülmemektedir. Bu bakımdan deniz yapılarında kullanılmaya oldukça elverişlidir (Genç 2006).

2.4 Uçucu Kül

Pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, ENV 197-1'de belirtildiği gibi tarif ve tayin edilen reaktif SiO_2 muhtevası kütlece en az % 25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Uçucu kül, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir (TS EN 450, 1998).

Uçucu kül terimi, 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi tüketiminin yaygınlaşması sonucunda ortaya çıkmıştır. 1970'li yıllarda yaşanan enerji maliyetindeki hızlı artış sonucunda, elektrik santrallerinde daha fazla kömür tüketilmeye başlanmıştır. Bunun sonucunda uçucu kül üretiminde bir artış meydana gelerek, uçucu kül kullanımı tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır.

Türkiye' de uçucu kül üretimi ve kullanımı 1968'li yıllarda başlamıştır ve günümüzde ise uçucu küllerin kullanım alanları oldukça fazladır. Bunlar arasında; çimento üretiminde puzolanik katkı maddesi ve beton içinde ikincil bağlayıcı madde olarak çimentoyla birlikte, tuğla ve yapı bloğu üretiminde; suni agrega üretiminde, enjeksiyon uygulamalarında, dolgu malzemesi olarak, yol inşaatlarında temel ve temel altı tabakası

olarak, zemin iyileştirilmesinde, atıkların stabilizasyonunda ve zirai amaçlarla kullanım sayılabilir (Özcan 1997).

Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür:

- Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen “taban külü”,
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması ile elde edilen “ham kül” ve
- Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan “uçucu kül” (Türker vd. 2004).

Bunlara ek olarak desülfürizasyon tesisi bulunan santrallerde sülfür içeren gazların, baca gazlarından ayrılması sırasında oluşan ürüne “baca gazı desülfürizasyon atıkları” olarak adlandırılan atık ortaya çıkar (Ağar 2007).

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

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 arttırır, ayrıca hidratasyon ısını azaltır. Çimento hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği gösterirler (Türker vd. 2003).

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).

Türk Standardları Enstitüsü, UK ile ilgili olarak beş tane standard yayınlamıştır. Bunlar sırasıyla, TS 639 (TS, 1975), TS 640 (TS, 1992), TS EN 450 (TS, 1998), TS EN 451-1 (TS, 2000) ve TS EN 451-2 (TS, 2000) standartlarıdır. Bu standartlara ait bilgiler, Çizelge 2.9’ da sunulmuştur. TS 640, AB’ye uyum çerçevesinde yürürlükten kaldırılmış ve yerine TS EN 197- 1 (TS, 2002) “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar” standardı uygulamaya konulmuştur (TS 1975, 1992, 1998, 2000).

Çizelge 2.9 UK ile ilgili Türk standartları (TS 1975, 1992, 1998, 2000)

Standard 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

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 (Technical Bulletin- 2, 2006).

Uçucu kül termik santrallerde yakılan kömürden elde edilen en büyük atıklardan biri olması nedeniyle dünya üzerinde yıllık 3000 milyon ton kömürden 300- 350 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir. Uçucu külün potansiyel tehlikeleri; Yeraltı suyuna ve zeminin içerisine, uçucu külden olası zehirli maddelerin sızması,

- Bitkilerde esas elementleri değiştirir.
- Besin zinciri boyunca bu zehirli elementlerin geri dönüşümünü artırır.
- İnsanlarda solunum problemleri başlar (Mendki et al. 2001).

2.4.1 Uçucu Külün Sınıflandırılması

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca; MgO , SO_3 alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Bunların yanı sıra birde C (çok ince taneli durumda olan yanmamış kömür) bulunmaktadır (Türker vd. 2003, Erdoğan 2003).

Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C 618 nolu standard, uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir (ASTM C 618, 1998). Bu sınıflandırma, Çizelge 2.10'da tanımlanmaktadır.

Ayrıca, %10'dan daha az CaO içeren uçucu küller, 'düşük kireçli uçucu küller', %10'dan daha çok CaO içerenler ise, 'yüksek kireçli uçucu küller' olarak adlandırılmaktadır.

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

Çizelge 2.10 ASTM'ye göre uçucu kül sınıfları (ASTM 1998)

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

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

- F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler.

Siliko alüminalı UK, F sınıfındadır. Siliko kalsik UK'lerin bazıları F sınıfı içinde, bazıları da C sınıfı içinde yer almaktadır. Sülfö kalsik UK'lerin çoğu, C sınıfı UK olarak isimlendirilmektedir (ASTM C 618, 1998).

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

- V sınıfı uçucu küller, çoğunluğu puzolanik özelliklere sahip küresel taneciklerden meydana gelen ince bir toz olup; esas olarak reaktif silisyum dioksit (SiO_2) ve alüminyum oksitten (Al_2O_3) oluşan; geri kalanı demir oksit ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan az, reaktif silis miktarının % 25'den fazla olması gerekmektedir.

- W sınıfı küller ise, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup; esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 'den oluşan; geri kalanı demir oksit (Fe_2O_3) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının % 10'dan fazla, reaktif silis miktarının da % 25'den fazla olması gerekmektedir (Erdoğan 2003, Türker vd. 2004, TS EN 2002).

UK, yapısındaki kireç ve SO_3 miktarına göre ise üç grupta toplanmaktadır. Bunlar;

- Esas yapısı siliko aluminatlardan meydana gelen, $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (S+A+F) toplamı % 70'in üzerinde olan ve genellikle taşkömüründen elde edilen siliko alüminalı UK,
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50 ile % 70 arasında olan ve kireç ile silika miktarı yüksek olan siliko kalsik UK,
- Genellikle linyit kömüründen elde edilen, S+A+F toplamı % 50'in üzerinde olan ve diğerlerine göre daha fazla SO_3 ve CaO ihtiva eden sülfü kalsik UK'lerdir (Aruntaş 2006).

2.4.2 Uçucu Külün Özellikleri

Uçucu külle ilgili olarak T.S.E.' ce hazırlanmış TS 639 "Uçucu Kül" standart mevcuttur. Bu standartta uçucu kül özellikleri ilgili olarak Çizelge 2.11' de verilen sınırlar getirilmiştir (Öz 2007).

Çizelge 2.11 Uçucu külün özellikleri (TS 639, 1975).

Özellikleri	Standart Sınırları
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	En çok %70
MgO	En çok %5
SO_3	En çok %5
Rutubet	En çok %3
Kızdırma kaybı	En çok %10
İncelik (blaine)	En çok $3000 \text{ cm}^2/\text{gr}$
PAI	En az kontrolün %70'i

2.4.2.1 Uçucu Külün Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Uçucu küllerin tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve elemanlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektrofiltrelerde toplananlardan daha iri tanelidirler. Uçucu küllerin renkleri açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar değişik tonlarda olabilir. İçindeki yanmamış karbon miktarı artıkça uçucu küllerin rengi koyulaşmaktadır (Ünal ve Uygunoğlu 2004).

Küldeki karbon, demir ve nem miktarı küllerin renklerin etkilemektedir. Mikroskop altında incelendiklerinde süngerimsi, gözenekli veya gözeneksiz küresel aglomere tanelerden meydana geldikleri görülmektedir. Linyit kömürü uçucu külleri, taş kömürü uçucu küllerinden daha koyu renklidir. İyi yanmış kömürün uçucu külü, iyi yanmamış kömürün uçucu külünden daha açık renktedir. İyi yanmamış kömürlerin uçucu küllerinin koyu rengi, yapılarında mevcut yanmamış karbondan ileri gelmektedir.

Bir uçucu külün tanecik şekli ve şekil özellikleri, kömürün kaynak ve üniformluğuna, yanmadan önceki öğütülme derecesine, yanma ortamına (sıcaklık seviyesi ve oksijen derişimi), yanmanın üniformluğuna ve kullanılan toplama sistemine bağlıdır. Uçucu kül taneciklerinin çoğunluğu camsı, içi dolu veya boş küresel şekillidir (Aci Committee 1987).

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.12’de verilmiştir. Tane boyutu, kullanılan kömürün cinsine ve öğütülme derecesine bağlı olarak değişmektedir. Taş kömürü uçucu küllerinin tane boyutu, linyit uçucu küllerinin tane boyutundan daha küçüktür. Tane boyutuna etki eden ikinci faktör ise, yakma sistemini terk eden boyutu küçük uçucu küllerin elektrofiltrelerde veya siklonlarda tutulma hassasiyetleridir. Sistemi terk eden küller ne kadar iyi yakalanırsa, o oranda ince taneli küller elde edilmektedir. Elektrofiltrelerde daha ince uçucu küller tutulabildiği için, elektrofiltrelerde tutulan uçucu küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulanlardan daha küçüktür. Genel olarak, uçucu küllerin tane boyutları 1- 200 μm , özgül yüzeyleri ise 0,1- 0,5 m^2/gr arasında değişmektedir (Toros 1987).

Çizelge 2.12 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri (Aruntaş 2006)

Çap (µm)	Şekil	Renk	Yoğunluk (g/cm ³)	İncelik
1- 200	Yuvarlak	Gri	2,2- 2,7	~Çimento inceliğinde

Türk uçucu küllerinin bulk yoğunluğu 0,88'den 1,44'e, özgül ağırlığı ise 1,83'den 2,99 g/cm³' e kadar değişim gösterir. Aynı zamanda tane boyutunun azalması ile birlikte, bulk ve özgül ağırlık da artmaktadır. Önemli yoğunluk farkları ise muhtemelen duvar kalınlıklarına, boşluk hızına ve parça çapının dağılımlarını etkilemektedir. Düşük bulk yoğunluğu, bu uçucu külleri hafif ağırlıklı bina bloklar için iyi bir malzeme yapmaktadır. Ama kuru uçucu külün depolanmasında ve nakliyesinde her zaman potansiyel bir sorun olan toz sorunu da hesaba katılmalıdır. Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır.

Uçucu küllerin özgül ağırlığı, bünyelerindeki kuvars, alümina, demir ve karbon miktarı ile değişmektedir. Küldeki demir miktarı arttıkça özgül ağırlık artmaktadır Ayrıca özgül ağırlık külün mineralojik yapısına göre de değişmektedir. Örneğin, iç dolu küresel tanelerden oluşan uçucu küllerin özgül ağırlıkları yüksek iken süngerimsi tanelerden oluşanların daha düşüktür. Uçucu küllerin ortalama özgül ağırlıkları 2,15 g/cm³'tür. Çizelge 2.13'de çeşitli uçucu küllerin bulk yoğunlukları ve özgül yüzey alanları görülmektedir (Bayat 1998).

Çizelge 2.13 Türkiye'deki uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı ve özgül yüzey alanları (Bayat 1998)

Uçucu kül	Bulk Yoğunluğu (g/cm ³)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)
Yatağan	1,07	1,99	0,334
Soma	0,95	2,12	0,207
Seyitömer	0,88	1,58	0,115
Yeniköy	1,44	2,99	0,168
Çatalağzı	1,07	1,95	0,139
Afşin-Elbistan	1,05	2,70	0,342
Tunçbilek	1,11	1,83	0,094

İçerisine bir mıknatıs daldırıldığında, bir miktar uçucu külün mıknatısa yapıştığı görülür. Manyetik özelliği olmadığı halde yapışan tanecikler, hafif bir hava akımı ile uzaklaştırılır. Yapılan deneyler sonucunda, uçucu küllerin yaklaşık %25'inin mıknatısta kaldığı görülmüştür. Kimyasal analizler, mıknatıs tarafından tutulan numunenin %63'ünün Fe_2O_3 olduğunu göstermiştir (Kolukısa 1999).

2.4.2.2 Uçucu Küllerin Kimyasal Özellikleri

Uçucu küllerin yapısının büyük bir bölümü (%60 - %90'ı) amorf durumdadır. Geri kalan bölümünde; müllit, kuvars, magnetit, hematit gibi kristaller yer alabilmektedir. Değişik termik santral uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu Çizelge 2.14'deki gibidir.

Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. O nedenle, hem portlant-puzolan tipi çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler.

Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15 - %50 civarında değişebilmektedir. Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve proses koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi) bağlıdır (Erdoğan 2003).

Temel oksitler olan; SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 'ın miktarları, uçucu külün silissi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde; SiO_2 %25- 60, Al_2O_3 %10-30, Fe_2O_3 %1-15 olarak ve CaO , %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır.

Diğer oksitlerden MgO en fazla % 5.0, alkali oksitler ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) %5.0'in altında bulunmaktadır. SO_3 genellikle % 0.2- 2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı

ve proses koşullarına göre, % 10'a kadar yükselmektedir. Ancak standartlardan özellikle TS EN 450 standardı (TS EN 450), SO₃ değerini en fazla %3 olarak dar bir aralık ile sınırlamaktadır.

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekte 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 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(TS EN 197-1 2002, TS 639 1988).

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 (TS EN 197-1 2002).

Çizelge 2.14 Değişik termik santral uçucu küllerin kimyasal kompozisyonu
(Erdoğan 2003)

Kimyasal İçerik	F Sınıfı Kül (CaO < %10)	C Sınıfı Kül (CaO > %10)
SiO ₂	43,6- 64,4	23,1- 50,5
Al ₂ O ₃	19,6- 30,1	13,3- 21,3
Fe ₂ O ₃	3,8- 23,9	3,7- 22,5
CaO	0,7- 6,7	11,5- 29,0
MgO	0,9- 1,7	1,5- 7,5
Na ₂ O	0- 2,8	0,4- 1,9
C (kızdırma kaybı)	0,4- 7,2	0,3- 1,9

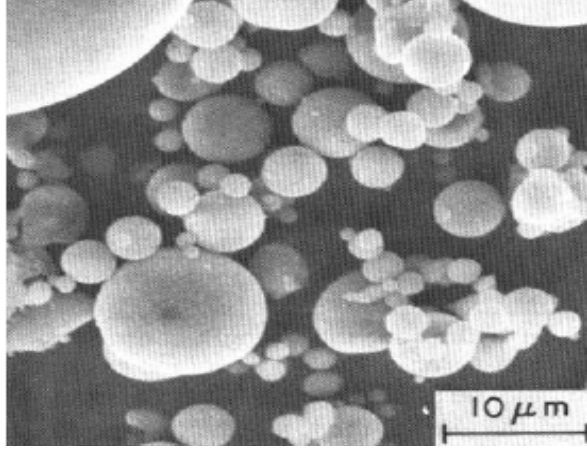
MgO, hidratasyon sonucunda betonda genişmeye yol açmaktadır. SO₃, sertleşmiş betonda etrenjit oluşumuna ve böylece çok büyük genişmelere neden olmaktadır. Alkali miktarının yüksek olması, reaktif silika içeren agregalarla reaksiyon olasılığını artırarak betonda genişmelere yol açabilmektedir. Karbon miktarı fazla olan uçucu küllerle yapılan hava sürüklenmiş betonlarda, daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Uçucu küllerde çok az miktarda nem de bulunabilmektedir. Nem miktarı fazla olan uçucu küller, kullanıcının işini birazcık zorlaştırmaktadır. Uçucu küllerdeki nem miktarının %3'den fazla olmaması gerektiğini belirtmektedir (ASTM C 618 1994).

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

2.4.2.3 Uçucu Küllerin Mineralojik Özellikleri

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal bileşiminden daha çok mineralojik yapıları ile ilişkilidir. Düşük kireçli uçucu küllerin ana aktif bileşeni, silis ve aluminadan oluşan amorf ya da camsı fazdır. Bu tip uçucu küller, rutubetli ortamda sönmüş kireç (CaOH₂) ile reaksiyona girdikleri için puzolanik özelliğe sahiptirler. Yüksek kireçli uçucu küller ise, hem puzolanik özellik gösterirler hem de sahip oldukları serbest kireç, trikalsiyum aluminat, amorf silis ve alumina vb. sebebiyle kendi başlarına bir miktar bağlayıcı özelliğe sahip olabilirler. Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM'deki görüntüsü Resim 2.5'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi uçucu kül tanecikleri, yuvarlak bir şekle sahiptir (Aruntaş 2006).



Resim 2.5 Tipik bir F sınıfı uçucu külün SEM’ de görünümü (Aruntaş 2006)

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

Genellikle, düşük CaO içeren küller başta camsı 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), hematit (Fe_2O_3) içermekte; yüksek CaO’li 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 ($\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{AlSi})_2\text{O}_7$), mervinit ($\text{Ca}_3(\text{Mg})(\text{SiO}_4)_2$), gibi mineraller ve camsı faz içermektedir. Bu bileşenlerin yanısıra 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 camsı fazı karakterize eden X-ışınları difraksiyon piklerinin maksimum durumları da birbirinden farklıdır. Camsı fazın difraksiyon pikinin maksimum olduğu bölge düşük kireçli uçucu külde $22-27^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) bölgesinde iken, yüksek kireçlide bu bölge $30-34^\circ 2\theta$ ($\text{CuK}\alpha$) bölgesinde yer almaktadır. Silissi camsı 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 alüminosilikat 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 özelliğin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır.

Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camsı faz genellikle; kalsiyum, alkali ve hidroksit lavesi 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 'den fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genleşmesi (aktif alümina ve SO_3 'den etringit oluşumu), serbest kireç ise hidratasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genleşme 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 genleşmesine yol açmamaktadır (Türker vd. 2003).

2.4.2.4 Uçucu Küllerin Morfolojik Özellikler

Tanecik morfolojisi ve büyüklük dağılımında, kömürün orijini ve homojen olması, kömürün pulverizasyon durumu yanma koşulları, yanmanın homojen ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır. Uçucu külde, büyüklükleri 0,5µm- 150µm arasında değişen hem camsı küresel hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekli ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır. Camsı küresel şekilli tanecikler, boşluklu küreler; büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar; yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar olarak bulunmaktadır.

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldispat gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılarda (kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır. Düşük kireç içerikli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunun yanı sıra senosfer ve plerosferler bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikro yapıya sahiptir. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de, düşük kireçli küller kadar düzgün değildir (Tikalsky and Carraullo 1992, Türker vd. 2007).

Uçucu kül taneleri; “precipitor” ve “cenosphere” olarak iki tipte sınıflandırılmıştır. Genellikle, uçucu külün katı küresel taneleri “precipitator fly ash” olarak adlandırılır ve yoğunluğu 1,0 gr/cm³’den daha az olan, uçucu külün boşluklu tanelerine “cenosphere fly ash” denmiştir. Uçucu küllerin ortak tipi genellikle; kuartz, müllit ve hematit gibi kristal bileşiklerden; silika camı gibi camsı bileşiklerden ve diğer oksitlerden meydana gelmiştir. 2,0-2,5 gr/cm³ arasında bir yoğunluğa sahip olan “precipitator fly ash”,

yoğunluğu azaltır, direnç kazandırır, dayanım, sertlik içerir ve seçilmiş matris materyallerinin çeşitli özelliklerini geliştirebilir.

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

Küçük olan katı taneler, büyük olan katı uçucu külden şekilce daha küreseldir. Fakat Cenosphere uçucu külü, precipitator uçucu külünden daha küreseldir ve şekli ebada bağlı değildir. Müllit ve kuartz camsı fazlardır. Uçucu kül ebatları arttıkça “precipitator fly ash” da toplam kristal fazların hacim kesri de artar.

Bu sonuçlar Uçucu külün büyüklüğü arttığı zaman uçucu külden müllitin bir artışına bağlı olarak “precipitator fly ash” da toplam kristalliği sunar. Kristal kuartz’ın miktarı tüm “precipitator fly ash” dan nispeten azdır ve uçucu kül ebadının fonksiyonu gibi işlemez. Uçucu kül (precipitator) ebadında kristalliğin bağımlılığı büyük ve küçük uçucu kül parçalarının arasında soğutma hızında farklılığından dolayıdır (Matsunaga vd. 2002).

2.4.3 Uçucu Külün Kullanım Alanları

Miktarı her geçen gün biraz daha artan uçucu küller, ya kuru olarak atık sahalarında biriktirilmekte ya da su ile karıştırılmak suretiyle uçucu kül barajlarına pompalanmaktadır. Her iki durumda da çevrenin kirlenme riski ortadan kaldırılamamaktadır. Çevre kirliliğini önlemek ve aynı zamanda ucuz bir malzeme kaynağı olarak kullanmak amacıyla, uçucu küllerin çeşitli alanlarda değerlendirilmesine çalışılmaktadır (Anderson ve Jackson 1993). Uçucu küllerin inşaat sektöründe Çizelge 2.15’de görüldüğü gibi farklı alanlarda kullanılabilmektedir (Aruntaş 2006).

Çizelge 2.15 Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar (Aruntaş 2006)

Malzeme	Kullanım amacı/ yeri
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğla, ateş tuğlası	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağlayıcı malzeme olarak
Yapı malzemeleri	Blok, panel, duvar, gazbeton, beton boru, cam, boya, seramik, plastik, harç
Çeşitli yapılar/ uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

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 ısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik yani bağlayıcılık özelliği gösterirler.

Antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler.

Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerekğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir. Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur.

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidrasyon ısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin ABD’ de ilk kullanım 1940’lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse

barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verildi ve Türk Standardları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını hazırlayarak yayınlamıştır.

Devlet Su işleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandı. Uçucu küllü çimento hemen hiç üretilmedi. Katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarlarda kül kullanıldı. Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarla sınırlı kaldı. Kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilenin %1'ine bile ulaşamadı. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton standartları çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır (Türker vd. 2003).

2.4.3.1 Gazbeton Yapımında Kullanımı

Gazbeton; çimento, kireç, kum ve alüminyum tozları ile uçucu küllerin karıştırılması sonucu elde edilir. Karışıma ilave edilen sıcak su, alüminyum tozları ve kireç arasında bir reaksiyona yol açar. Böylece istenilen boyutlarda elde edilen bloklarda oluşan çok sayıda hidrojen kabarcıklarından hidrojenin uzaklaşıp havanın girmesi ile dayanıklı ve hafif bir yapı malzemesi elde edilir. Daha sonra otoklavlarda buhar uygulaması ile fiziksel ve kimyasal özellikleri iyileştirilen bloklar, kullanıldıkları binalarda ısı yalıtımının yanı sıra, hafif olmaları sebebiyle taşımada da kolaylık sağlarlar (Akar 2000).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1 Uçucu Kül

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

3.1.1.1 Uçucu Külün Kimyasal Özellikler

Çalışmada ana hammadde olan uçucu külün kimyasal, fiziksel ve mineralojik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Uçucu külün kimyasal analizi XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Uçucu külde bulunan toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranı toplam %76,50 olarak elde edilmiştir. Buna göre F sınıfı (puzolanik) uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün bileşiminde Gazbeton üretiminde zararlı olabilecek oranda bileşiğe rastlanmamıştır.

Seyitömer uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'un altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. Reaktif silis miktarının % 25' in üzerinde olması nedeniyle de TS EN 197-1'de V sınıfı uçucu kül için istenilen koşullara tamamen uymaktadır. $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı ortalama, %76,5 olup ASTM C 618'e göre % 70'in üzerinde ve CaO'in % 10'dan az olması nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir.

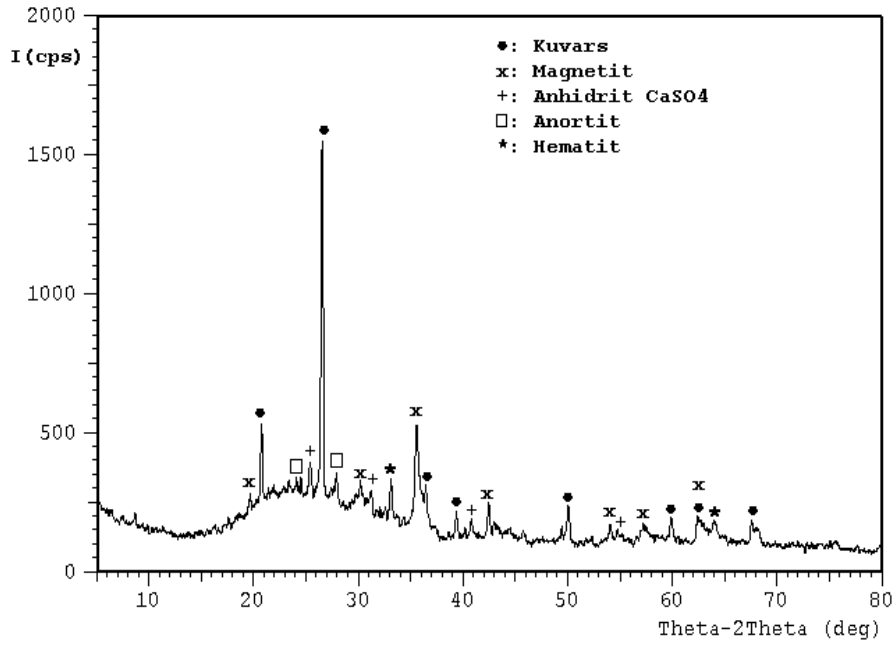
Seyitömer uçucu külü, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarının % 70'in üzerinde olması nedeniyle, TS 639'da istenen şarta uymaktadır.

Çizelge 3.1 Seyitömer uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

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
Toplam	96,89

3.1.1.2 Uçucu Külün Mineralojik Özellikler

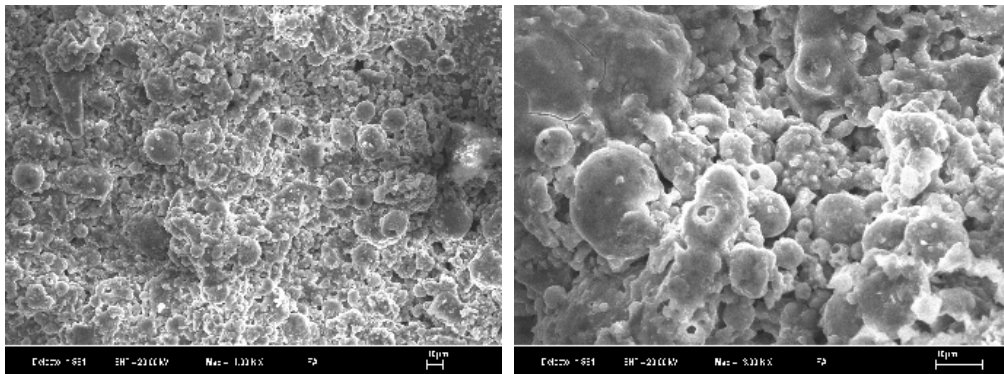
Seyitömer termik santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Seyitömer uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı

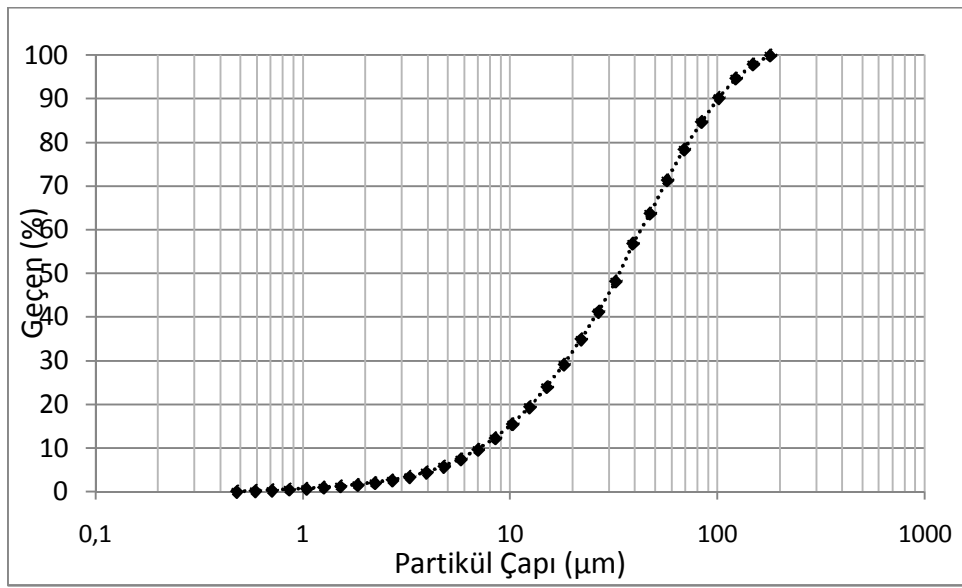
3.1.1.3 Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri

SEM ile yapılan incelemeler sonucunda uçucu kül içerisindeki silika küreciklerinin boyutlarının 1 ile 15 μm arasında değiştiği gözlenmiştir. Küreciklerin şekillerinin çoğunun düzenli olduğu, bazı kürelerin ise kristalizasyon şartlarına bağlı olarak küresellikten uzaklaştığı ve gözenek içerdiği gözlenmiştir (Resim 3.1).



Resim 3.1 Uçucu kül içerisindeki silika küreciklerinin şekil ve boyut görünüşleri

STS uçucu külüne ait tane boyut analizi değerleri Şekil 3.2’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül ve TS EN 197-1’de CEM I (42,5 R) çimentosunun Blain incelik ve özgül ağırlık değerleri belirlenmiştir. Buna göre çimento ve uçucu külün incelik değerleri sırası ile 3054 cm²/g ve 2564 cm²/g olarak elde edilmiştir. Çimento ve uçucu külün özgül ağırlık değerleri ise sırası ile 3,07 gr/cm³ ve 2,1 gr/cm³ olarak elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu külün tane boyutu lazer tane boyutu analiz cihazı (particle size analyser) ile belirlenmiştir. Buna göre uçucu külün d₅₀ değeri: 33 µm’dir. Uçucu külün %90’nı 100 µm’nin altındadır.



Şekil 3.2 STS Uçucu külünün lazer tane boyutu analizi.

3.1.2 Çimento

Karışımlarda Afyon Set Çimento A.Ş.’den alınan CEM I 42,5 R tipi Portland kompoze çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin, TS EN 197- 1 ve TS EN 197- 2’de belirtilen standart değerlere uygun olduğu görülmüştür. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 CEM I 42,5R Portland kompoze çimentosu özellikleri

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

3.1.3 Kireç

Serilerde Adaçal Endüstriyel Minareller Sanayi A.Ş.'den alınan kireç kullanılmıştır. Kirecin fiziksel ve kimyasal analizleri Çizelge 3.3'te, fiziksel ve kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.4'de verilmiştir (Anonim 2010).

Çizelge 3.3 Kirecin fiziksel ve kimyasal analizleri (Anonim 2010)

Kimyasal analizler	%	Fiziksel analizler	
CaO	92,12	90 µm üzeri	4,52
SiO ₂	0,06	Reaktivite(t ₆₀)	37sn
MgO	0,22	Verim	2,48 dm ³ /kg
SO ₃	0,07		
R ₂ O ₃	0,52		
CO ₂	0,27		

Çizelge 3.4 Kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri (Anonim 2010)

Molekül ağırlığı	56
Fiziksel görünüm	Beyaz toz veya granül
Renk	Beyaz
Koku	Kokusuz
Erime noktası	2600°C
Parlama noktası	Uygulanamaz
Kaynama noktası	Uygulanamaz
Tutuşabilirlik	Tutuşmaz
Patlama tehlikesi	Patlayıcı değil
Hacim ağırlığı	0,7-1,2 kg/dm ³
Buhar basıncı	Buharlaşmaz
pH (25°C de)	12,5 (doymuş solüsyonda)
Özgül ağırlık	3,35 g/cm ³ (20 °C de)
Bölünme katsayısı	Uygulanamaz
Suda çözünübilirlik	1,4 g/L 0 °C' de, 1,25 g/L 20 °C' de (Ca(OH) ₂) olarak

3.1.4 Kimyasal Katkılar

Kimyasal katkıları, betonun taze ve/veya sertleşmiş haldeki özelliklerini değiştirmek için karıştırma işlemi sırasında çimentonun %5'ini geçmemek üzere eklenen maddeler olarak tanımlanmaktadır.

3.1.4.1 Priz Hızlandırıcı Katkı

TS EN 934- 2002'de, karışımın plastik halden katı hale geçmeye (prizin) başlama süresini kısaltan kimyasal katkıdır.

3.1.5 Su

Gazbetonun üretiminde karışım suyu olarak Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, A.N.S. Kampüsü şebeke suyu kullanılmıştır (Ekim 2009- Nisan 2010).

3.2 Metot

Bu çalışmada; uçucu kül, çimento, kireç, süper akışkanlaştırıcı katkı ve hava sürükleyici katkının çeşitli oranlarda karıştırılması ile farklı karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımların oranları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım oranları

SERİLER	UÇUCU KÜL (gr)	ÇİMENTO (gr)	ALÇI (gr)	KİREÇ (gr)	ALÜMİNYUM TOZU (gr)	SU (ml)	PRİZ HIZLANDIRICI (gr)
A	1100 (1,1)*	1100 (1,1)*	-	220 (0,22)*	1,1	2000 (2,00)*	-
B	1000 (1,0)*	1000 (1,0)*	200 (0,20)*	250 (0,25)*	1,5	2500 (2,50)*	1,5
C	1000 (1,0)*	1500 (1,5)*	250 (0,25)*	250 (0,25)*	1,5	2500 (2,50)*	1,5
D	1000 (1,0)*	1500 (1,5)*	300 (0,30)*	250 (0,25)*	1,5	2000 (2,00)*	-
E	1500 (1,5)*	1500 (1,5)*	300 (0,30)*	250 (0,25)*	1,5	2500 (2,50)*	-
F	1500 (1,5)*	1500 (1,5)*	300 (0,30)*	300 (0,30)*	1,5	3000 (3,00)*	-
*Parantez içindekiler kütlece oransal değerleridir.							

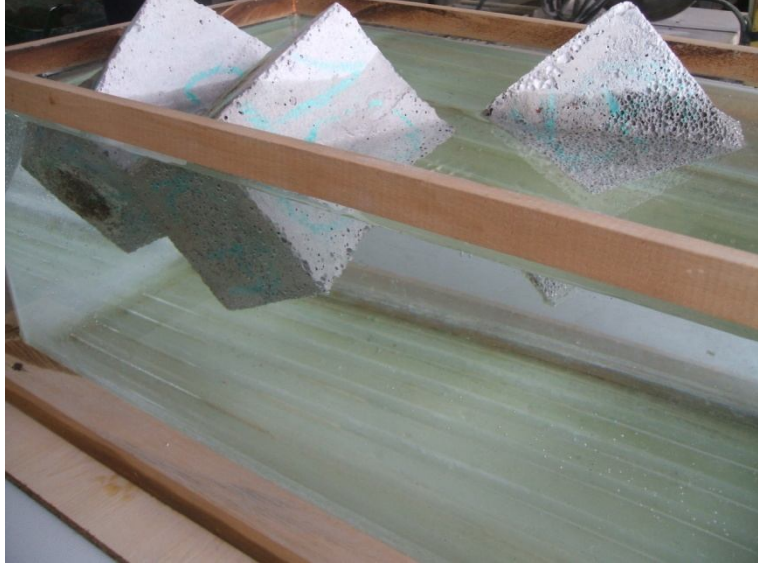
Karışıma giren malzemeler önce uçucu kül, çimento, alçı, su ve bazı serilerde priz hızlandırıcı olmak üzere karışım kabına konularak el mikseri ile homojen dağılım sağlanıncaya kadar (ort: 3 dk.) karıştırılmış, daha sonra kireç ve alüminyum tozu eklenerek ort. 2 dk süreyle tekrar karıştırılmıştır (Resim 3.2). Akıcı kıvamda hazırlanan gazbeton harcı homojenliğini kaybetmeden 100*100*100 mm metal kalıplara, 2/3’ü dolacak biçimde dökülmüştür. Harcın uygun ortamda genleşmesi için kalıplar 60 °C sıcaklıkta etüve yerleştirilmiştir. Kalıplardaki genleşme yaklaşık 30 dk’da tamamlanmış ve prizini tamamlaması için aynı sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Prizini tamamlayan örnekler kalıptan çıkarılarak otoklava yerleştirilmiştir (Resim 3.3). Örnekler otoklavda 8 saat süreyle ve 0,125 Mpa (1,25 Bar) doygun buhar basıncında kür işlemi uygulanmıştır. Resim 3.4’te etüv sonrası numunelerin su yüzeyindeki görüntüsü verilmiştir.



Resim 3.2 Malzemelerin el mikseriyle karıştırılması



Resim 3.3 Otoklav



Resim 3.4 Etüvden çıkan malzemelerin gözenek kontrolü

3.2.1 Fiziksel ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Fiziksel ve mekanik özelliklerin belirlenmesinde uygulanan yöntemler bu bölümde verilmiştir.

3.2.1.1. Birim Hacim Ağırlık Değerleri

Örneklerin birim hacim ağırlığı değerleri eşitlik 1.5'ten yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$D_h = \frac{M_k}{V_h} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1.5)$$

D_h: Birim hacim ağırlığı (kg/m³),

M_k: Etüv Kuru Ağırlığı (kg),

V_h: Numunenin hacmi (dm³).

3.2.1.2 Basınç Dayanımı

Fiziksel özellikler belirlendikten sonra karışım örneklerinin basınç mukavemet testleri 200 kN'luk bilgisayar kontrollü otomatik basınç presinde gerçekleştirilmiştir. Her örnek serisi için ortalama 6 adet numune teste tabi tutularak aritmetik ortalamaları verilmiştir.

Basınç mukavemet testinde kullanılan cihaz ise bilgisayar destekli pres olup Resim 3.6'da gösterilmiştir.

Örneklerin basınç dayanım değerleri eşitlik 1.7'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$f_b = \frac{P_k}{A_0} \times k \text{ (Kgf/cm}^2\text{)} \quad (1.7)$$

f_b : Basınç mukavemeti (kgf/cm²)

A_0 : Basınç uygulanan yüzün alanı (cm²)

P_k : Kırılma anındaki yük (kg)

k : Numunenin biçim katsayısı ($k=1$)



Resim 3.6 Basınç presi

3.2.1.3 Isı İletkenlik Deneyi

Deney numunelerinin ısı iletim katsayılarının (λ) ölçülmesinde Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine mühendisliği laboratuvarında bulunan “Shotherm QTM- D2” ısı iletkenlik cihazından yararlanılmıştır.

Shotherm QTM-D2 ısı iletkenlik cihazı "Hot Wire" yönteminden yararlanılarak geliştirilmiş bir ısı iletkenliği ölçüm cihazıdır. Bunun için numuneler ısı iletim katsayısını ölçen cihazın probuna uygun olarak 100 mm uzunluğunda, 50 mm genişliğinde ve 17 mm kalınlığında hazırlanmıştır. Shotherm QTM-D2 cihazının ölçme yönteminde ısıtıcı tel, ısı iletim katsayısı bilinen yalıtkan bir malzemeye, ısı iletim katsayısı ölçülmek istenen malzeme arasına yerleştirilir. Bu durumda ısı iletim katsayısı aşağıdaki formülden hesaplanır:

$$k = F \frac{Q \ln(t_2 / t_1)}{T_2 - T_1} - H \quad (1.8)$$

F , H : ölçme cihazına ait sabitler

Q : ısıtıcı tele verilen ısı akısı

t_1 , t_2 : ölçüm zamanları (saniye)

T_1 : t_1 zamanındaki sıcaklık

T_2 : t_2 zamanındaki sıcaklık

Her standart QTM probunun farklı F ve H sabitleri vardır. Bu sabitler bilindiğinde yukarıdaki formülden ısı iletim katsayısı cihaz içindeki bir mikro kompüter ile hesaplanır. 60 saniye içinde malzemenin belli bir sıcaklık değeri için ısı iletim katsayısı dijital olarak ekranda verilir. Bu cihazın en önemli avantajlarından birisi, ölçüm esnasındaki ısı kayıplarının, ölçümün kısa sürede yapılmasından dolayı çok az miktarda olmasıdır. Cihaz 0.020–10 W/mK aralığında ısı iletim katsayısını $\pm\%5$ hassasiyet ile ölçebilmektedir.

4. BULGULAR

Üretilen seriler üzerinde birim hacim ağırlık, basınç dayanımı, ısı iletkenlik ve ultrases deneyleri yapılmış olup sonuçları bu bölümde verilmiştir.

4.1. Örneklerin Mekanik Özellikleri

Gazbeton deney örneklerin birim hacim ağırlık değerleri 550 kg/m^3 ile 760 kg/m^3 arasında değişmektedir. Elde edilen değerler ticari gazbeton ürünlerin birim ağırlık değerlerine benzerlik göstermektedir (Çizelge 4.1). Örneklerin basınç mukavemeti değerleri 0,65 ile 3,72 MPa arasında değişmektedir. Bu değerler ticari gazbeton örneklerin basınç mukavemeti değerlerine göre daha düşüktür. Buna gazbeton üretim sürecinde uygulanan otoklav basıncına göre (10- 12 Bar) daha düşük basınçta (1,15 Bar) otoklav uygulamasının neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.1 Deney numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri

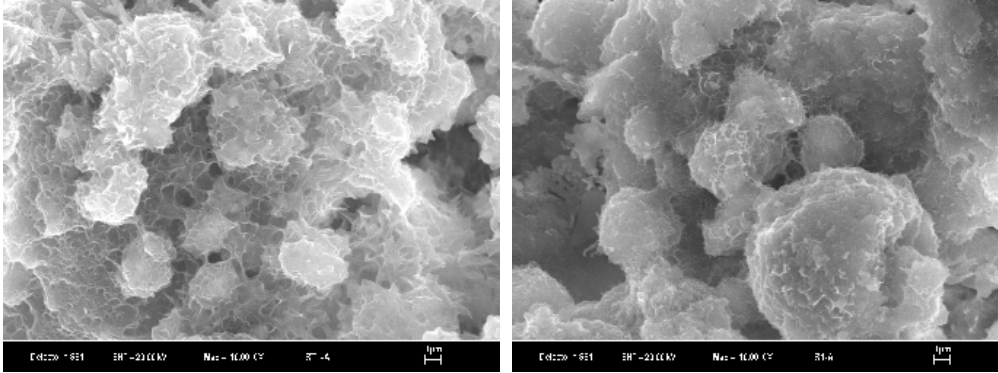
Seriler	Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenlik (W/mK)	Ticari Gazbeton Birim Hacim Ağırlık (kg/m^3)	Ticari Gazbeton Basınç Dayanımı (MPa)	Ticari Gazbeton Isı İletkenlik (W/mK)
A	660	2,10	0,16	400	2,5	0,15
B	550	0,65	-	500		0,17
C	760	2,21	-	500	3,5	0,17
D	620	3,04	-	600		0,20
E	670	3,72	0,17	600	5,0	0,20
F	740	3,30	0,17	700		0,23

Örneklerin ısı iletkenlik değerleri 0,16 ile 0,17 W/mK arasında elde edilmiştir. Buna göre örneklerin birim ağırlık değerleri ile ısı iletkenlik değerleri arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Örneklerin birim ağırlık değerleri arttıkça ısı iletkenlik değerlerinde

artış gerçekleşmiştir. Buna birim ağırlığın artması ile daha yoğun ve buna bağlı olarak toplam gözenek oranında azalmanın neden olduğu düşünülmektedir.

4.2. Örneklerin Otoklav Kürü Sonrası Mikroyapı Analiz Sonuçları

123 °C ve 1,15 bar otoklav kürü şartlarında üretilen seriler arasında yüksek oranda çimento içeren seri ile daha düşük çimento içeren numuneler üzerinde SEM incelemesi yapılmıştır. (Numune seçimleri yapılırken mukavemet değerleri temel alınmıştır). Yapılan SEM incelemeleri sonucunda (Resim 4.1) yüksek oranda çimento içeren (C) (çimento/uçucu kül=1,5) numunesinde çimentodaki C_3S fazının hidratasyonu sonucuna oluşan yoğun CSH jeli oluşumları gözlenmiştir. (C) numunesine göre daha az çimento içeren (B) numunesinde (çimento/uçucu kül=1,0) ise daha az CSH jel yapısı gözlenmiştir. Çimento hamurunda oluşan CSH jelinin uçucu kül tanelerini çevrelemiş ve kül tanelerini bağlamış görüntüsü dikkat çekmiştir. Uçucu kül tanelerinin çimento hamuruyla çevrelendiği fakat genel küresel yapılarını korudukları gözlenmiştir.

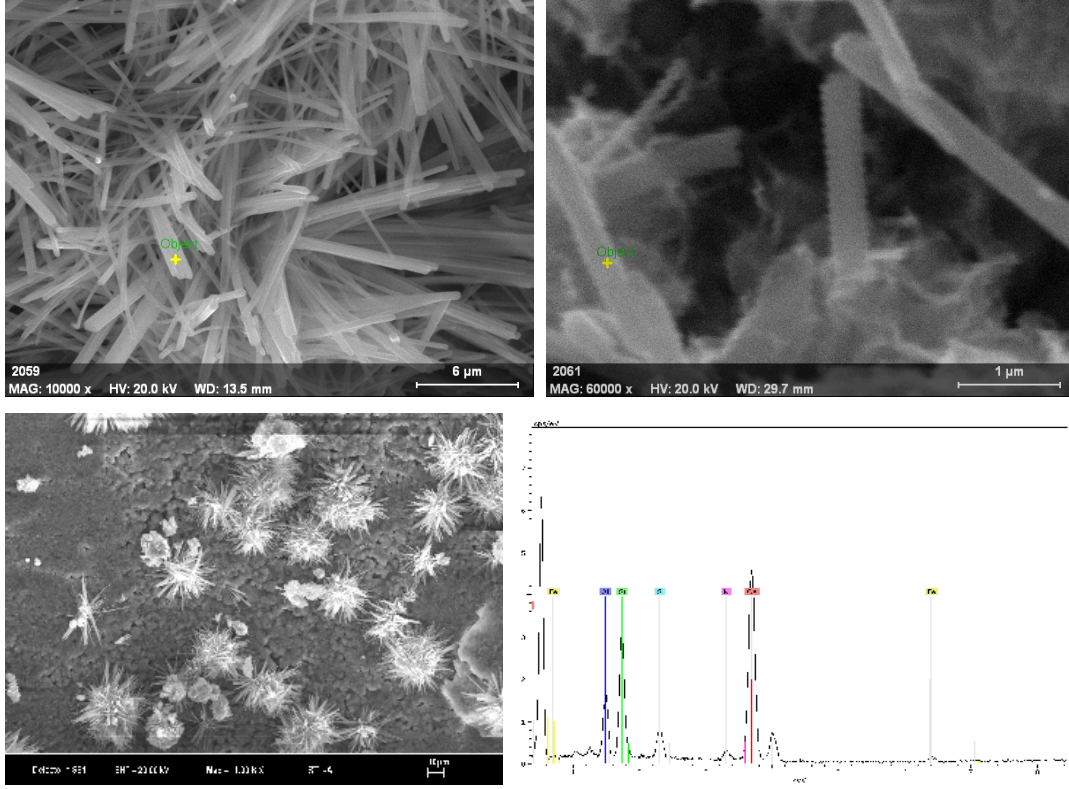


Yüksek Çimento içerikli (C)

Düşük Çimento İçerikli (B)

(Resim 4.1) Yüksek ve düşük oranda çimento içeren karışımların SEM içyapı görüntüleri.

(C) numunesinde yapılan SEM incelemesinde iğnemsî içyapı oluşumlarına rastlanmıştır. Yapılan görüntüleme ve EDX analizleri sonucunda iğnemsî yapının etringit oluşumları olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 4.2’de etringit oluşumunu gösteren içyapı resimleri ve EDX analizleri gösterilmiştir.



Resim 4.2 Yüksek çimento içerikli (yüksek mukavemetli) numunede etringit oluşumları

Bilindiği gibi çimento içerisinde başlıca trikalsiyum silikat; $3\text{CaO}.\text{SiO}_2(\text{C}_3\text{S})$, dikalsiyum silikat; $2\text{CaO}.\text{SiO}_2(\text{C}_2\text{S})$, trikalsiyum alüminat; $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}_3\text{A})$ ve tetrakalsiyum alümino ferrit; $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{C}_4\text{AF})$ mineral fazları bulunmaktadır. Sülfat içerikli bileşikler ve çimentodaki C_3A fazının aşağıdaki reaksiyonu sonucu etringit fazı oluşur.



Deneylerde kullanılan uçucu külün XRD analizi sonucunda, külün içerisinde anhidrit halinde CaSO_4 mineralinin varlığı tespit edilmiştir. Yüksek oranda çimento içeren (C) numunesindeki etringit varlığı bu nedenle kolayca açıklanabilmektedir. Çünkü (C) numunesindeki yüksek orandaki çimentodan gelen C_3A fazı ile uçucu külden gelen CaSO_4 içeriği (C) numunesinde etringit oluşumuna neden olmuştur. Benzer etringit oluşumu daha düşük oranda çimento içeren (B) numunesinde gözlemlenmemiştir. Etringit oluşumu erken mukavemet kazanımına faydalı olsa da uzun dönemde uygun

şartlarda gerçekleştiğinde aşırı su emme eğilimi nedeni ile aşırı genleşmelere yol açabilmektedir. Bu genleşmeler fiziksel hasarlara yol açabilmektedir. Bu nedenle gazbeton üretiminde imento miktarının azaltılması gerekmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada geleneksel gazbeton üretiminde kullanılan silis kumu yerine silika kaynağı olarak uçucu kül kullanılmıştır. Deney örnekleri klasik gazbeton üretiminde uygulanan yüksek otoklav basıncı (10-12 Bar) yerine düşük otoklav basıncında (1,15 Bar) kür edilmiştir. Uygulanan düşük otoklav basıncı nedeniyle örneklerin mikro yapılarında mukavemete katkı sağlayan CSH fazlarının yeterli oranda gelişmediği belirlenmiştir. Örneklerin birim hacim ağırlık değerleri benzer ticari gazbeton ürünlerle uyum göstermektedir. Yeterli basınç dayanımı değerlerinin elde edilebilmesi ve karışımdaki çimento oranlarının azaltılabilmesi için daha yüksek buhar basınç değerlerinde otoklav kürü uygulanmasının basınç dayanımını artıracığı düşünülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda daha yüksek basınçta otoklav kürü uygulanarak çalışmaların sürdürülmesi uygun olacaktır.

6. KAYNAKLAR

- Acı Committee 226, September-October 1987 Use of Fly Ash in Concrete, ACI Materials Journal, pp. 381-409.
- Ağar, E., 2007, “Seyitömer Termik Santral Uçucu Küllerinin Yapı Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Akar, M., 2000, “Uçucu Kül Den Üretilen Cam-Seramiklerin Kristalizasyon Kinetiğinin ve Karakterizasyonunun İncelenmesi”, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Akbaba, H., 2007, “Agrega Türünün Hafif Blokların Özelliklerine Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Anderson, M., Jackson, G., 1993, “Benefication of Power Station Coal and Its Use in Heavy Clay Ceramics”, Trans. J. Brit. Ceram. Soc., Vol.82, No.2, pp. 50- 55.
- Anonim, 2010, “Sönmemiş Kireç (CaO)”, Adaçal Endüstriyel Mineraller Sanayi Ticaret A.Ş. Afyonkarahisar.
- Aruntaş, H., Albayrak, Y., Saka, M., Aydın, H., Tokyay, M., 1998, “Ankara–Kızılcahamam ve Çankırı–Çerkeş Yöresi Diatomitlerinin Özelliklerinin Araştırılması” Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, Syf. 337–343.
- Aruntaş, H., Y., 2006, “Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri”, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: 21, No: 1, s. 193-203, Ankara.

- 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.
- Aydın, A. C., 1998, “Diyatomit, Pomza ve Pasa’nın Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydın, O., 2007, “Termik Santral Atığı Küllerin Yapı Tuğlası Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Afyon.
- Balanlı, A. , 1997, “Yapıda Ürün Seçimi”, Y.T.Ü, Yayın No: 4 İstanbul.
- Bave, G., 1983, “Regional Climatic Conditions, Building Physics And Economics. Autoclaved Aerated Concrete, Moisture And Properties, Proceedings Of The RILEM International Symposium On Autoclaved Aerated Concrete”, Development In Civil Engineering, Vol 25 1-12, Swiis.
- Bayat, O., 1998, “Characterisation of Turkish Fly Ashes”, Fuel, Vol. 77, No. 9/10, pp. 1059-1066.
- Bilgiç, M., 2009, “Yüksek Performanslı Prefabrike Hafif Betonların Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bilgin, İ., 1994, “Yapı Üretiminde Ürün - Süreç İlişkisi”, Y.T.Ü, Yayın No: 294, İstanbul.
- Bingöl, A.F., 2002, “Pomza İle Üretilen Hafif Betonların Yangına Karşı Dayanımı”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.

- Borat, M., 1992, “Türkiye Diyatomitlerinin Özellikleri ve Filtrasyon Karakteristikleri”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Borhan, B., 1987, “Ytong El Kitabı- 1”Ytong Teknik Yayınları No:1, İstanbul.
- Budwell International Ltd, 2004, “What is Autoclaved Concrete”, Amsterdam.
- Büyükçulha, L., 1987, “Perlit Katkısının Pişmiş Toprak Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Davranışlarına Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- 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., 2001, “Afyon Bölgesi Tüflerinin Tuğla Üretiminde Kullanılması”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., Kahraman, E., 2008, “Seyitömer Uçucu Külü ve Afyonkarahisar Yöresi Volkanik Tüflerinin Puzolanik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Syf. 39- 46, Afyon.
- DPT, 2001, “Pomza”, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı-Madencilik Özel İhtisas Komisyon Raporu, 23 s. Ankara.
- Erdoğan, T. Y., 2003, “Beton”, Metu Press, 1. Baskı.
- Erdoğan, T. Y., 2007, “Beton”, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.

Erdoğdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P. , 2002, “Traslar ve Traslı Çimentolar”, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.

EM 1110-2-2000, Chapter 10, 1 Feb 1994.

Genç, S. S., 2006, “Diyatomit Katkılı Betonların Yük Altındaki Davranış ve Kullanılabilirlik Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

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, Afyon.

Gündüz, L., 1998, “Pomza Teknolojisi: Pomza Karakterizasyonu”, Cilt 2, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta.

Gündüz, L., Sarıışık, A., Tozaçan, B., Davraz, M., Uğur, İ., Çankıran, O., 1998, “Pomza Teknolojisi”, Isparta.

Hasol, D., 1967, “Yapının Endüstrileşmesi”, Mimarlık.

Kara, İ., 2008, “Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Karagüler, M.E., 1988, “Isıl İşlem Parametrelerinin Hafif Beton Özelliklerine Etkisi”, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Karaman, O., Arı, K., Haktanır, T., Atis, C. D., 2005, “İki Farlı Portland Çimentolu Betonların Dayanımına Zaman ve Kür Etkisinin Araştırılması”, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Sayı: 21, Kayseri.

- Kolukısa, S., 1999, “Uçucu Kül İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kömürlü, R., Önel, H., 2007, “Gazbeton Yapı Ürünlerinin Konutlarda Kullanımı”, YTÜ Mimarlık Fakültesi E- Dergisi, Cilt 2, Sayı 3, Syf 145- 158, İstanbul.
- Matsunaga, T., Kim, J.K., Hardcastle, S., Rohatgi, P. K., 2002, “Crystallinity and Selected Properties of Fly Ash Particles”, Materials science & Engineering A 325, pp. 333-343.
- Meisenger, A.C., 1985. “Diatomite, minerals facts and problems”, United States Department of The Interior, pp. 1-6.
- Mendki, P. S., Maheshwari, V. L., Kothari, R. M., 2001, “Flyash as a Post-Harvest Preservative for Five Commonly Utilized Pulses”, Crop Protection 20, 241-245.
- Meral, C., 2004, “Use of Perlite as A Pozzolanic Addition in Blended Cement Production”, M.E.T.U., Thesis Of Master Of Science.
- Narayanan N., K.Ramamurthy , “Structure and perties of Aerated Concrete”, A Review, Cement and Concrete Composites 22 (2000) 321-329.
- National Ready Mixed Concrete Association, CIP 36, 2003.
- Neville, A.M., 1981, “Properties of Concrete”, Longman Scientific & Technical, New York.
- Okan, A., 1978, “Toplu Konut Üretiminde Araştırma Yaklaşımı”, Mimarlık, Syf. 43.

- Öz, V., 2007, “Hafif Agregalı Blok Üretiminde Yatağan Uçucu Külünün Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Özbey, G. ve Atamer, N., 1987, “Diatomit Hakkında Bazı Bilgiler”, 10. Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi, Ankara.
- Özcan, M., 1997, “Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerinin ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özışık, G., 2000, “Beton”, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., 1986, “Beton”, Cilt 1, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- Serin, G., 1999, “Pomzanın Hafif Beton Blok Duvar Elemanı Olarak Kullanılmasının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Şimşek, O., 2004, “Beton ve Beton Teknolojisi”, Seçkin Yayınevi, Ankara.
- Technical Bulletin-2, 2006, “Chemical Comparison of Fly Ash and Portland Cement”, Headwaters Resources, Utah, A.B.D.
- Tikalsky, P.J. and Carraquillo, R.L, 1992, “Influence of fly ash on sulphate resistance of concrete”, ACI Materials Journal, 89, 1, 69-75.
- Tokyay, M., Erdoğan, K., 1998, “Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu”, TÇMB, Ankara.
- Tokyay, M., 1993, “Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanı Sempozyumu, Ankara.

- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2003, “Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., 2004, “Türkiyede Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., 2007, “Türkiye’ deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri”, TÇMB, AR-GE, Y03.03, Syf. 102.
- TS 25, 1975, “Tras”, 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.
- TS 2511, 1977, “Taşıyıcı Hafif Betonların Hesap Esasları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 3234, 1978, “Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE 197–1, 2002, “Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TSE 197–2, 2002, “Çimento-Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 206- 1, 2002, “Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk”, 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 EN 934, 2002, “Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2 : Beton katkıları -Tarifler, özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Topçu, İ.B., Altun, F., Arı, K., 2005, “Kayseri Yöresi Hafif Agregalı Özellikleri ve Taşıyıcı Beton Üretimi”, Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergi, Isparta.
- Topçu, İ. B., 2006, “Beton Teknolojisi”, Uğur Ofset A.Ş., Eskişehir.
- Toros, H., 1987, “Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Ens., İstanbul.
- Uygunoğlu, T., 2005, “Afyon ve Çevresindeki Hafif Agregalarla Üretilen Blok Elemanların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Uygunoğlu, T., 2008, “Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Özellikleri”, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

Ünverdi, A., 2006, “Yüksek Sıcaklık Altında Gazbeton Kırıklı Betonların Dayanımlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Ünal, O., 2004, “Beton Teknolojisi ve Uygulamaları Ders Notları” Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yapı Eğitimi Bölümü, Afyon.

Ünal, O., Uygunoğlu, T., 2004, “Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi”, Türkiye 14. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak.

Ünsal, N., 2001, “İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji”, Gazi Üniversitesi Müh- Mim.Fak., Ankara.

Yeğinoğlu, A., 2002, “Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı”, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.

YTÜ Mim. Fak. E-Dergisi Cilt 2, Sayı 3, 2007.

Wikipedia Encyclopedia, “Aerated Autoclaved Concrete”, December, 2005.

6.1. İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

- | | |
|---|------------|
| 1. http://www.yapi.com.tr/V_Images/arastirma/Gazbeton.pdf | 21.10.2008 |
| 2. http://www.teias.gov.tr/istatistik2008/9.xls | 17.06.2010 |
| 3. www.sektorelfuarcilik.com/uevf/sunumlar/ot10-03.doc | 15.11.2008 |
| 4. http://tr.wikipedia.org/wiki | 12.06.2010 |

5. www.ytong.com.tr 26.04.2009
6. [www.akg- gazbeton.com](http://www.akg-gazbeton.com) 23.05.2010
7. <http://www.bulak.net/duvarda.asp>. 20.01.2009
8. [http://muhendislik/ atauni/insaat/dersler/acaydin/yapimalz.pdf](http://muhendislik/atauni/insaat/dersler/acaydin/yapimalz.pdf) 19.12.2008

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Şerife KOZAK

Doğum Yeri: Emirdağ

Doğum Tarihi: 06.11.1984

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Emirdağ Sağlık Meslek Lisesi 2002

Lisans: Süleyman Demirel Üniversitesi 2007

Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi 2010

Yaptığı Çalışmalar: Gazbeton Üretiminde Uçucu Külün Hammadde Olarak Kullanımının Araştırılması