

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**UÇUÇU KÜLÜN GAZBETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

GÖKHAN ÖZEL

OCAK 2013

ÖZET

UÇUCU KÜLÜN GAZBETON ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZEL, Gökhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. İlhami DEMİR

Ocak 2013, 80 sayfa

Gazbeton ince öğütülmüş silisli bir agrega ve inorganik bir bağlayıcı madde (kireç ve/veya çimento) ile hazırlanan karışımın gözenek oluşturucu bir madde ilavesi ile hafifletilmesi ve buhar kürü ile sertleştirilmesi ile elde edilen gözenekli hafif betondur.

Bu çalışmada; gazbeton üretiminde hammadde olarak, kuvars kumu yerine kullanılan uçucu külün, gazbeton üzerindeki basınç dayanımı, kuru yoğunluk değeri, rutubet muhtevası ve ısı iletkenlik değerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, duvar elamanı olarak kullanılan ve ticari olarak üretimi yapılan G2/04 sınıfı gazbeton üretimi baz alınarak, Çatalağzı Termik Santralinden alınan uçucu kül, hammadde olarak kullanılan silis kumu (kuvars kumu) yerine %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek gazbeton örnekleri üretilmiştir. Yapılan numuneler 60 °C sıcaklıkta 4 saat buhar küründe bekletildikten sonra 180 °C'de 11 bar basınçta 6,5 saat otoklavda küre tabi tutulmuştur.

Sonuç olarak, gazbetona kuvars yerine uçucu kül ikamesinde ısı iletkenlik bakımından optimum oranın %10 olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Gazbeton, uçucu kül, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FLY ASH ON THE PROPERTIES OF THE AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

ÖZEL, Gökhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlhami DEMİR

January 2013, 80 pages

The autoclaved aerated concrete is a porous concrete which is obtained from a mixture composed of fine pulverized silicated aggregate and inorganic binding material (lime and/or cement) and produced by lightening the mixture with a substance causing production of pores and hardening it with steam curing.

In this study, the effect of the addition of fly ash used as a raw material in the production of autoclaved aerated concrete on the compressive strength, dry density, moisture content and thermal conductivity values of the aerated concrete was investigated. In the study, the samples of autoclaved aerated concrete were produced by replacing fly ash obtained from Çatalağzı Thermal Power Plant as a raw material instead of silica sand (quartzite) by the ratio of 5%, 10%, 15%, 20% and 25% based on the production of autoclaved aerated concrete in the class of G2/04, which is used as a wall member and produced commercially. The produced samples were subjected to curing in autoclave at 180 °C and under the pressure of 11 bars for a 6,5 hrs after steam curing at 60 °C for 4 hrs.

As a result, the replacement of fly ash instead of quartzite at the production of autoclaved aerated concrete, the optimum ratio is determined as %10 in terms of the thermal conductivity.

Key Words: Autoclaved aerated concrete, fly ash, compressive strength, unit weight, thermal conductivity.

TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Doç. Dr. İlhami DEMİR'e, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam ve ağabeyim, Sayın Dr. Okan CENGİZ'e ve büyük fedakarlıklarla bana destek olan arkadaşım Musa SAVAŐ'a, tezimin birçok aşamasında yardım gördüğüm AKG Gazbeton ve Çalışanları'na ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da yardımlarını esirgemeyen Eőim ve Çocuklarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özetleri.....	3
1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı.....	6
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Gazbeton.....	7
2.1.1. Gazbeton Üretimi.....	10
2.1.2. Gazbeton Özellikleri.....	11
2.1.2.1. Gazbetonun Fiziksel Özellikleri.....	11
2.1.2.2. Gazbetonun Kimyasal Özellikleri.....	16
2.1.2.3. Gazbetonun Mekanik Özellikleri.....	18
2.1.3. Gazbetonun Sağladığı Avantajlar.....	20
2.1.4. Gazbetonla İlgili Bazı Standartlar.....	21
2.2. Uçucu Kül.....	22
2.2.1. Uçucu Külün Sınıflandırılması.....	24
2.2.2. Uçucu Külün Özellikleri.....	26
2.2.2.1. Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri.....	26
2.2.2.2. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri.....	29
2.2.2.3. Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri.....	31
2.2.2.4. Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri.....	32
2.2.3. Uçucu Külün Kullanım Alanları.....	34
2.2.4. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri.....	36
2.2.5. Uçucu Külün Çimento Özelliklerine Etkileri.....	38

2.2.6. Uçucu Külün Gazbeton Yapımında Kullanımı	39
2. MALZEME ve METOT	40
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	40
3.1.1. Kuvars kumu	40
3.1.2. Uçucu Kül	41
3.1.2.1. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri	41
3.1.2.2. Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri	43
3.1.2.3. Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri	44
3.1.3. Çimento	45
3.1.4. Kireç	46
3.1.5. Alçı Taşı	46
3.1.6. Alüminyum Tozu.....	47
3.1.7. Su	48
3.2. Metot	48
3.2.1. Fiziksel ve Basınç Dayanım Özelliklerin Belirlenmesi.....	53
3.2.1.1. Basınç Dayanımı	53
3.2.1.2. Kuru Yoğunluk.....	55
3.2.1.3. Rutubet Muhtevası	56
3.2.1.4. Isı İletkenlik Deneyi	57
3.2.1.5. SEM ve EDS analizi.....	58
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	59
4.1. Basınç Dayanım Özellikleri	59
4.2. Kuru Yoğunluk Özellikleri	60
4.3. Rutubet Muhtevası	61
4.4. Örneklerin Isıl İletkenlik Özellikleri.....	62
4.5. Mikroyapısal Özellikleri	63
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	72
KAYNAKLAR	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Gazbeton üretiminde kullanılan hammadde miktarları	9
2.2. Gazbetonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri	13
2.3. Kuru gazbetonun ısı iletkenlik değerleri.....	13
2.4. Ticari gazbetonun mekanik özellikleri	18
2.5. Gözenekli beton yapı malzeme ve elemanlarının sınıfları	19
2.6. Uçucu küller ile ilgili Türk standartları	24
2.7. ASTM'ye Göre Uçucu Kül Sınıflandırılması.....	25
2.8. Uçucu külün özellikleri (TS EN 197-1).	26
2.9. Uçucu külün özellikleri (ASTM C 618).	26
2.10. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	27
2.11. Türkiye'deki uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı ve özgül yüzey alanları.	29
2.12. Türkiye'deki uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları	30
2.13. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar	35
3.1. Gazbeton prosesine uygun bir kuvarsit veya silis kumunun kimyasal bileşimi	40
3.2. Çalışmada kullanılan Kırşehir Boztepe yöresi kuvarsitin kimyasal analizi	41
3.3. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları	42
3.4. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçlarına göre standartlara uygunluk sınırları ve sonuçların değerlendirilmesi	43
3.5. Deneyde kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	46
3.6. Deneyde kullanılan kirecin özellikleri.....	46
3.7. Deneyde kullanılan alçı taşının fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
3.8. Deneyde kullanılan ana malzemedeki toplam SiO ₂ oranı.....	48
3.9. Deneyde kullanılan malzeme ve 1 m ³ karışım oranları	49
4.1. Deney numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Gazbetonun görünümü.....	7
2.2. Türkiye’de gazbeton tüketimi.....	8
2.3. Avrupa’da 2004 yılı gazbeton tüketim miktarları	8
2.4. Gazbeton ürünlerinin yapıda kullanıldığı yerler.....	10
2.5. Gazbeton üretim şeması.....	11
2.6. Gazbeton içerisindeki hava gözenekleri	12
2.7. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı	33
2.8. Uçucu kül tipleri	33
2.9. İngiltere’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları	36
3.1. Çatalağzı uçucu külünün EDS analizi	42
3.2. Çatalağzı uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı	44
3.3. Çatalağzı uçucu külünün yüzey yapısına ait SEM görüntüleri.....	45
3.4. Deneyde kullanılan alüminyum süspansiyon görünümü.....	47
3.5. Deneyde kullanılan malzemelerin tartılması	49
3.6. Hammaddelerin karıştırılması	51
3.7. Karışımın numune kaplarına dökülmesi.....	51
3.8. Deney numunelerinin hava küründe kabarması	52
3.9. Otoklavdan çıkan deney numuneleri	53
3.10. Numunelerin basınç dayanımı için boyutlandırılması.....	54
3.11. Basınç deneyinin yapılması	54
3.12. Numunelerin etüvde bekletilmesi	56
3.13. Isıl İletkenlik deneyinin yapılması.....	58
3.14. Jeol JSM5600 cihazı elektron mikroskobu cihazı	58
4.1. Deney numunelerinin basınç dayanımı grafiği.....	60
4.2. Deney numunelerinin kuru yoğunluk değerleri grafiği	61
4.3. Deney numunelerinin rutubet muhtevası grafiği	62
4.4. Deney numunelerinin ısı iletkenlik değerleri grafiği.....	62

4.5. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun SEM görüntüsü (X 35)	63
4.6. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)	64
4.7. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun EDS analizi	64
4.8. %10 Uçucu kül ikameli (UK10) gazbetonun SEM görüntüsü (X 35).....	65
4.9. %10 Uçucu kül ikameli (UK10) gazbetonun EDS analizi	65
4.10. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 1000)	66
4.11. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)	66
4.12. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 5000)	67
4.13. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 10000)	67
4.14. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 35)	68
4.15. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun örneklerinin EDS analizi	68
4.16. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 250)	69
4.17. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 1000)	69
4.18. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)	70
4.19. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 5000)	70
4.20. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 10000)	71

SİMGELER DİZİNİ

λ	Isı iletkenlik değeri
μm	Mikrometre
Db	Desibel
kgf	Kilogramkuvvet
MPa	Mega paskal
f	Basınç dayanım değeri
A	Kesitin olarak alanı
F	Kırılma anındaki yük
ρ	Yoğunluk değeri
m	Kuru kütle
V	Hacim
μ	Rutubet muhtevası oranı
$^{\circ}\text{C}$	Santigrad derece

KISALTMALAR DİZİNİ

A.B.D.	Amerika Birleşik Devletleri
AAC	Autoclaved Aerated Concrete
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Beton Test Metotları Standardı
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
PÇ	Portland Çimentosu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
UK	Uçucu Kül
XRD	X-ray Diffraction

1. GİRİŞ

Gazbeton (AAC), ince silis esaslı malzeme, gözenek oluşturan maddeler ve su ile birleştirilen çimento ve/veya kireç gibi bağlayıcılardan imal edilir. Hammaddeler birlikte karıştırılır ve karışım kabarak kek oluşturabileceği kalıplara dökülür. İşlemin bu kısmı bittikten sonra kek, elemanların istenen boyutlarına göre kesilir ve otoklavlarda yüksek basınçlı buhar ile kürlenir [1].

Bir başka tanımıyla gazbeton; 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. Gazbetonun endüstrileşmiş üretiminde, genellikle silisli agrega olarak silisçe zengin olan kum, kuvarsit veya uçucu kül, gözenek oluşturucu olarak ise alüminyum tozu veya macunu kullanılmaktadır [2].

Gazbetonun üretilmesinde en büyük adım J. A. Eriksson tarafından atılmış ve bulunduğu yöntem 1924 yılında Durox patent adı altında İsveç'te üretilmeye başlamıştır. 1950'ye kadar pek bir ilerleme sağlanamamış olsa da, bu tarihten sonra Avrupa'da ve dünyanın başka birçok yerinde hızlı bir şekilde yaygınlaşmıştır [3].

Ülkelerin nüfus, ekonomik ve teknolojik alanda büyümelerine paralel olarak artan enerji ihtiyacı olduğu bir gerçektir. Enerji ihtiyacının karşılanması için alternatif enerji kaynakları arayışı devam etmekte ve mevcut enerji üretim potansiyellerinin kullanımı da artırılmaktadır. Bu kapsamda hidroelektrik santrallerine ağırlık verilmekte, rüzgâr enerjisi, nükleer enerji gibi yeni nesil enerji kaynakları arayışı devam etmektedir.

Ülkemiz için büyük bir potansiyele sahip olan termik santraller elektrik üretiminde önemli bir yere sahiptir. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Türkiye'de çalışan

Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon ton kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santralarda kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir [4].

Uçucu kül, termik santrallerde pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [4].

Bu gün Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. 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 [4,5].

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 rüzgâr 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 [6].

Açığa çıkan UK'in standartlara uygun olan kısmı yapı malzemeleri sektöründe kullanılmakta, uygun olmayan ve kullanılmayan büyük bir kısmı ise kül dağlarında ve barajlarında biriktirilmektedir.

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 [7].

1.1. Literatür Özetleri

Uçucu kül kullanılarak üretilen gazbetona ait yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Çelik (2005), Gazbeton üretiminde kullanılan çimentoyu; %0, %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında eksilterek, yerine uçucu kül ikame etmek suretiyle üretilen gazbeton örnekleri üzerinde yapmış olduğu çalışmada; %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 uçucu kül katkı oranlarındaki gazbeton deney numunelerinin ortalama basınç dayanımları sırasıyla; 2,81 N/mm², 2,62 N/mm², 2,53 N/mm², 2,32 N/mm², 2,15 N/mm² ve 2,01 N/mm² olarak elde etmiştir. TS 453'de belirtilen sınıflandırmaya göre, %5'den %15 uçucu kül katkı oranına kadar G2 sınıfı gazbeton üretiminde, %15'den %30 uçucu kül katkı oranına kadar da G1 sınıfı gazbeton üretiminde kullanılabilceği ve uçucu kül katkı miktarı arttıkça gazbetonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin az da olsa olumsuz yönde etkilendiği belirtmiştir [8].

Kara (2008), yapmış olduğu çalışmada; kuvars kumu yerine %100 oranında sepere kül kullanılarak üretilen gazbeton numunelerin birim ağırlığını ~0.75 kg/dm³ ve basınç dayanımını ~3.50 MPa, olarak tespit etmiştir. Üretilen bu numunenin ticari gazbetonlara göre basınç dayanımının düşük çıktığı görülmektedir. Kuvars kumu yerine %50 oranında sepere kül ve %50 oranında taban külü kullanarak üretilen

gazbeton numunelerinin birim ağırlığını $\sim 0.50 \text{ kg/dm}^3$ ve basınç dayanımını $\sim 3.00 \text{ MPa}$ olarak tespit etmiştir. Elde edilen bu ürünün TS 453'e göre G2/0.5 gazbeton sınıfında olduğunu belirtmektedir [9].

Kozak (2010), yapmış olduğu çalışmada; kuvars kumu yerine Seyitömer (Kütahya) termik santralinden alınan uçucu kül kullanmıştır. Harcın priz süresini kısaltmak amacı ile bazı serilerde priz hızlandırıcı katkıları (CaCl ve NaSO_4) kullanmış ve deney örneklerine ortalama 8 saat süre ile düşük basınçlı (1,15 Bar) otoklavda kür uygulamıştır. Yapılan çalışma sonucunda deney numunelerinin basınç dayanımlarının düşük olduğu ve yeterli basınç dayanımı değerlerinin elde edilebilmesi ile karışımdaki çimento oranlarının azaltılabilmesi için daha yüksek buhar basınç değerlerinde otoklav kürü uygulanmasının basınç dayanımını artıracığı belirtilmektedir [6].

Güçlüer (2011), yapmış olduğu çalışmada; gazbeton üretiminde ana hammadde olarak kullanılan silis kumu yerine uçucu kül ve bağlayıcı olarak kullanılan çimentoya da %3, %6, %9 ve %12 oranlarında silis dumanı ikame edilerek gazbeton örnekleri üretmiştir. Örneklere $177 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 8 bar buhar basıncı altında 6 saat süreyle otoklav kürü uygulanmış, örneklerin birim hacim ağırlıkları $0.6-0.7 \text{ kg/dm}^3$ arasında olup basınç dayanımları 2.5 MPa ile 4.4 MPa arasında bulunmuştur. Silis dumanı ikameli serilerde, kontrol karışımına göre birim hacim ağırlıkta azalma, basınç dayanımlarında ise artma görülmüş, en yüksek basınç dayanımının %3 silis dumanı ikameli serilerde olduğu belirlenmiştir [10].

Gazbetonda uçucu kül, çimentodan çok, ince kum ikamesi olarak kullanılır. Amerikan Gazbeton Üreticileri Birliği, uçucu külün gazbetonda %75 oranına kadar kullanılmasını önermektedir [11].

Holt vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, burada muhtemelen uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olması nedeniyle kireç ile reaksiyona girerek mikro yapıyı güçlendirici yeni bağlar ürettiği belirtilmiştir. Koyu gri veya siyaha yakın atığın gazbeton üretimine katılması nihai ürün rengini koyulaştırdığı veya gri renge çevirdiğini belirtmişlerdir [12].

Narayanan vd. (2000) hidratasyon ürünlerinin yapısını, uçucu kül katkının gözenek oluşumuna etkisini ve boşluk matris ara yüzeyindeki geçiş zonunu araştırdıkları çalışmada; karışım oranlarındaki farklılıkların (kum/uçucu kül oranı) ve uygulanan kür yöntemlerinin (buhar kürü/otoklav kürü) gazbetonun mikroyapı özelliklerini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Yapıları itibari ile kum ve uçucu kül malzemeli gazbetonlar zamanla gelişen hidratasyon derecelerine bağlı olarak dikkate değer farklılıklar göstermekte olduğu, başlangıçta sadece çimento hidrate olurken, arkasından nispeten daha yavaş biçimde uçucu külde hidrate olduğunu belirtmektedirler [13].

Kunhanandan Nambiar vd. (2006)'ne göre, gazbetonda, belirli bir yoğunluk için kumun uçucu kül ile yer değiştirmesi (uçucu kül ikamesi) mukavemette artış sağlamaktadır. Çimento-kum karışımına göre, çimento-uçucu kül karışımı örnekler nispeten daha yüksek su emme oranına sahip olduğunu belirtmektedirler [14].

Kearsley vd. (2000)'nin yaptığı, araştırmalar göstermiştir ki, çimentonun %60'a kadar uçucu kül ile ikamesi çimento pastasının özelliklerini geliştirmektedir. Uçucu külün çimento ile yüksek oranlarda (%75'e kadar) yer değiştirmesi sonucu köpük betonun basınç mukavemetinde dikkate değer artış elde edilmiştir [15].

Literatürde özetlerinde de belirtildiği üzere, ya uçucu kül gazbetona çimento yerine belirli oranlarda ikame edilerek kullanılmış yada tamamen kuvarsit yerine kullanılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalarda genelde üretilen deney numunelerine düşük otoklav basıncı uygulanmıştır. Bizim yapmış olduğumuz çalışmada ise; uçucu kül ana malzeme olan kuvarsit yerine belirli oranlarında ikame edilerek kullanılmış ve ticari gazbetonlara uygulanan yüksek sıcaklık ve basınçta otoklav kürü uygulanmıştır.

1.2. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bir atık olarak ortaya çıkan uçucu küllerin birçok alanda kullanılabilceği, bu kullanım sayesinde çevre kirliliğini önlemede faydalı olacağı ve ekonomiye kazandırılabilceği görülmektedir.

Gazbeton üretiminde hammadde olarak kullanılan kuvarsit öğütülerek ortalama 90 mikron inceliğe getirilerek kullanılırken, uçucu kül yeterli ince dane boyutu nedeniyle ilave bir öğütme işlemi gerektirmeden gazbeton üretiminde kullanılabilir.

Bu çalışmada; uçucu külün, gazbeton üretiminde alternatif bir malzeme olarak kullanılabilirliği ile atık malzeme olan uçucu külün gazbetonda kullanılarak çevreye verdiği zararların minimize edilmesi ve ekonomiye kazandırılması, ayrıca, uçucu külün ana malzeme olan kuvarsit yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek kullanılması ve performansı yüksek gazbeton üretilmesi amaçlanmıştır. Burada ikame oranlarının bu şekilde seçilmesinin nedeni; ana malzemenin toplam SiO₂ oranının minimum %75-78 arasında olması istendiğinden dolaydır.

Bu kapsamda, duvar elamanı olarak kullanılan ve ticari olarak üretilen G2/04 (2 MPa basınç dayanımı, 400 kg/m³ yoğunluk) sınıfı gazbeton üretilmesi baz alınarak şahit numune ile uçucu külün, ana malzeme olan kuvarsit yerine ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek üretilen deney numuneleri üzerinde, basınç dayanımı, kuru yoğunluk, rutubet muhtevası ve ısı iletkenlik değerleri belirlenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Gazbeton

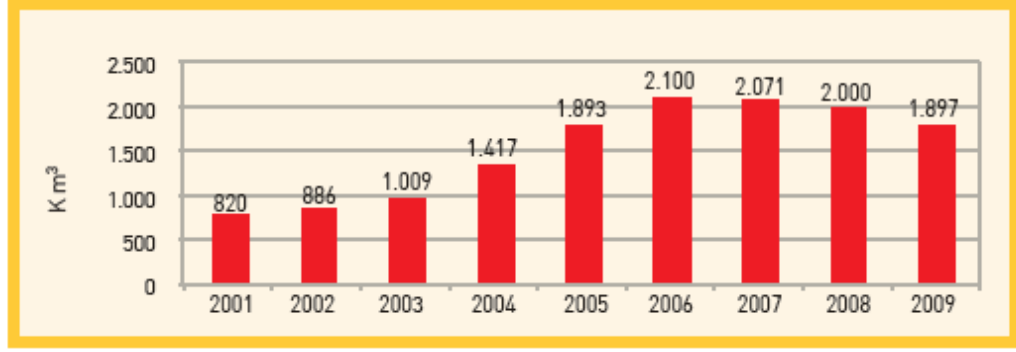
Türkiye’de ilk gazbeton üretimine 1966 yılında başlanmış, 18 Kasım 1989 tarihinde TS 453 “Gaz ve Köpük beton Yapı Malzeme ve Elemanları” Standardı yayınlanmıştır [16].



Şekil 2.1. Gazbetonun görünümü [17].

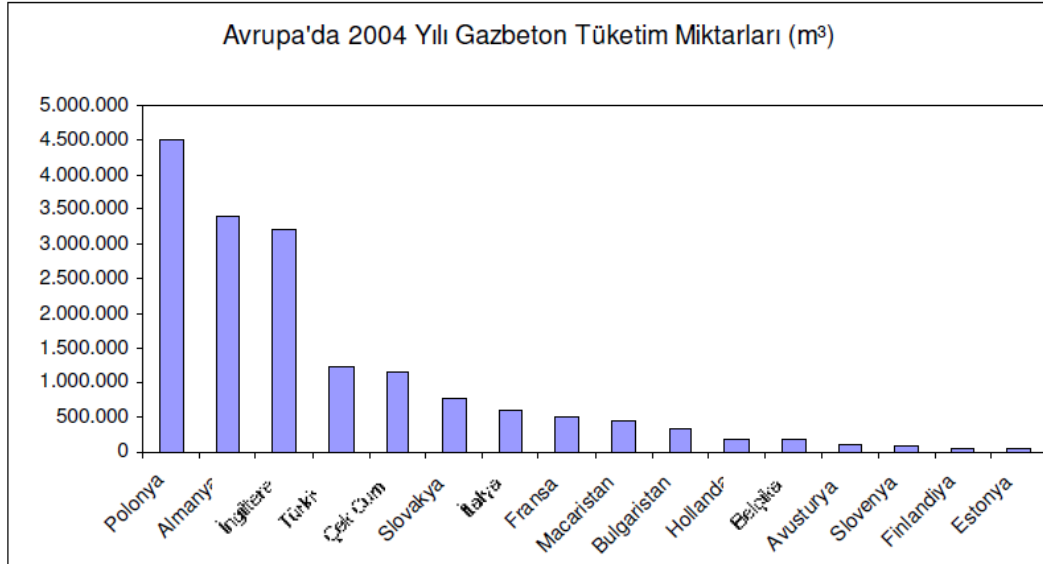
Gazbeton ilk olarak 1920’li yıllarda İsveç’li mimar Johan Eriksson tarafından keşfedildi. 1924 yılında patent altına alınan gazbeton 1929 yılında ytong adıyla üretilerek kullanılmaya başlandı. 1945 yıllarda Alman Josef Hebel Tarafından Donatılı gazbeton patenti alınarak üretime geçirilmiş olan gazbeton, günümüzde tüm dünyada çok sayıda ülkede üretilerek yapı sektöründe kullanılmaktadır [18].

TÜRKİYE'DE GAZBETON TÜKETİMİ (2001-2009)



Şekil 2.2. Türkiye’de gazbeton tüketimi [19].

Türkiye, Dünya’nın büyük gazbeton üreticisi ülkeleri arasındadır. Gazbeton üretiminde Türkiye Avrupa pazarında 4. sırada yer almaktadır. Gazbeton tüketimi ile Avrupa ülkeleri arasında ilk beşe girmektedir. Bugün Türkiye’de 5 kuruluşa ait toplam 9 adet gazbeton üretim tesisi bulunmaktadır [20]. Türkiye’de 2011 yılı itibariyle yıllık 3.625.000 m³ üretim yapılmaktadır.



Şekil 2.3. Avrupa’da 2004 yılı gazbeton tüketim miktarları [21].

Gazbetonun bileşenleri üretilen malzeme sınıfına göre değişmektedir. Malzemeyi oluşturmak üzere hazırlanan bu bileşenlerin oranları her firmanın kendine özgü belirlemiş olduğu reçetelere bağlı kalınarak hazırlanmaktadır. Genellikle ağırlığın %60'ını katı içerikler oluştururken, geriye kalan %40'ını ise su oluşturmaktadır [3].

Katı malzemelerin oranları yapılışına göre değişir fakat genellikle yüzde oranları (katı ağırlık bazında) aşağıdaki gibi olmaktadır.

1. Kuvars kumu (veya uçucu kül) : %30
2. Çimento : %17
3. Kireç : %6
4. Alçıtaşı : %5,5
5. Alüminyum tozu : %0,001

Çizelge 2.1. Gazbeton üretiminde kullanılan hammadde miktarları [18].

Hammaddeler & Kuru Yoğunluklar	400 kg/m ³	500 kg/m ³	600 kg/m ³
Kuvars kumu	210 kg	292 kg	352 kg
Sönmemiş kireç	50 kg	62 kg	98 kg
Çimento	99 kg	99 kg	99 kg
Alçı taşı	14 kg	18 kg	21 kg
Alüminyum tozu	0.55 kg	0.46 kg	0.39 kg
Toplam katı	373 kg	471 kg	570 kg
Karışımdaki su miktarı (buhar hariç)	230 kg	290 kg	355 kg



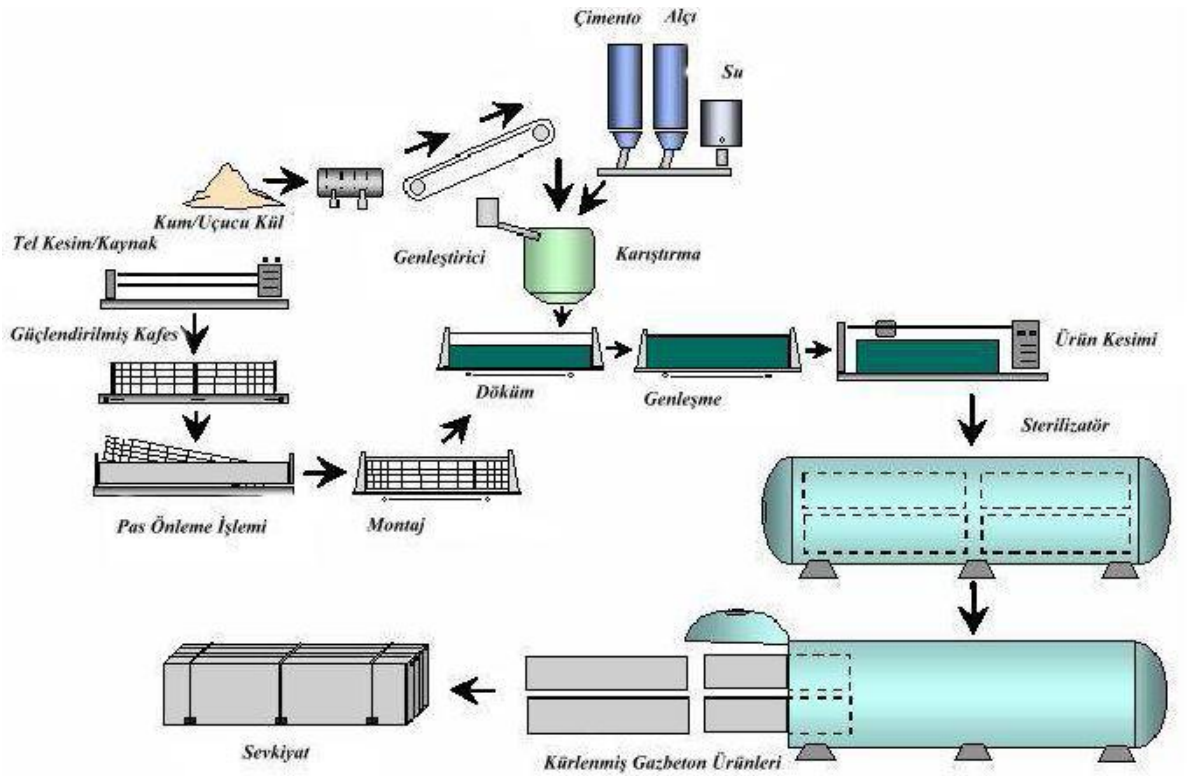
Şekil 2.4. Gazbeton ürünlerinin yapıda kullanıldığı yerler [17].

2.1.1 Gazbeton Üretimi

Gazbeton üretiminde; kum (kuvars, kuvarsit vb), kireç, çimento, alçıtaşı, su ve genişletici madde (alüminyum) kullanılır, böylece üretilen betonda boşluklu bir yapı oluşması sağlanmış olur [22].

Gaz beton üretiminin isleyiş adımları Şekil 2.5.'de verildiği gibidir. %80'i 90 mikron incelikte öğütülmüş kuvars kumu çamuru, %90'ı 90 mikron incelikte öğütülmüş sönmemiş kireç ve PÇ 42.5 çimento ve alüminyum tozu ile belirlenen miktarlarda hazırlanan karışımlar miksera gönderilir. Burada yaklaşık 2 dk karıştırılır ve kalıplara boşaltılır. Bu karışımın kalıplara dökülmesiyle birçok kimyasal reaksiyon meydana gelir. Alüminyum tozu, kalsiyum hidroksit ve suyla reaksiyona girerek hidrojen çıkışına sebep olur ve bu hidrojen çıkışı sulu beton içinde baloncuklar oluşturarak hacminin artmasını sağlar ve böylece beton kabararak boşluklu bir yapı kazanır. Reaksiyon ve priz alma işlemleri için bekleyeceği fermantasyon alanına gönderilir. Bu süre yaklaşık 3 saattir. Daha sonra, priz alan kekler kesme makinelerinde milimetrik hassasiyette belirli boyutlarda kesilir. Kesilen kekler kape ayırma ve blok ayırma işlemlerine tabi tutulur. Buradan otoklav tavalara alınıp, otoklav arabaları

ile birlikte otoklavlara beslenir. Buradaki süre toplam 12 saat civarındır. Bu sürede kekler, 11,5 – 12 bar ve 195 C sıcaklıkta kürlemeye tabi tutulur. Otoklavdan çıkartılan gaz betonlar boşaltma, paletleme ve shrinkleme ünitelerinden sonra, forkliftler vasıtası ile stoklama sahasına alınır [18].



Şekil 2.5. Gazbeton üretim şeması [22].

2.1.2 Gazbeton Özellikleri

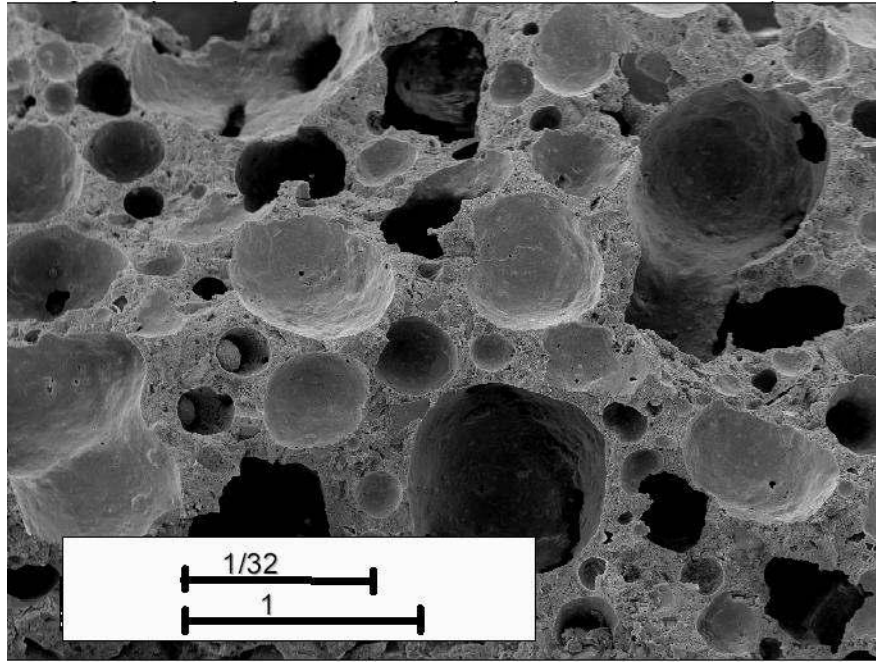
2.1.2.1. Gazbetonun Fiziksel Özellikleri

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 kütleli genişmeden meydana gelmektedir ve mikro gözenekler ise bu makro gözenekler arasındaki duvarlarda

oluşmaktadır. 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 [22].

Özgül ağırlığı: Gazbeton malzemenin ortalama boşluksuz özgül ağırlığı 2,60 kg/dm^3 dür.

Porozite: Gazbetonun porozitesi kuru birim hacim ağırlığı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Çizelge 2.2.'de çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite (kapalı gözenek) değerleri verilmiştir [23].



Şekil 2.6. Gazbeton içerisindeki hava gözenekleri [22].

Çizelge 2.2. Gazbetonun çeşitli birim hacim ağırlıkları için porozite değerleri [23].

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 2.3'de verilmiştir

Çizelge 2.3. Kuru gazbetonun ısı iletkenlik değerleri [23-24].

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 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. 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. Geleneksel kuruma büzülmesi değeri, rölatif uzunluk değişimleri ile rutubet muhtevalarını bir grafik üzerine noktalanmasıyla ortaya çıkan eğriden kütlece %30 ve %6 rutubet muhtevalarındaki uzunlukların rölatif değişimi olarak tayin edilir. Deney numuneleri (20±2)°C ve %45'den daha az olmayan rölatif rutubetli havada bekletilerek yavaş yavaş kurutulur ve deney numunelerinin deney ölçüm boyları ve bu sıradaki kütleleri, uygun zaman araları ile beklenen %4'ten daha az olmayan rutubet muhtevalarına erişilinceye kadar, en az beş kere tayin edilir [25].

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 [26].

Su emme-kusma: 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 azı kimyasal bağlantı ile bünyede kalmakta, diğer kısmı ise buharlaşma yolu ile bünyeden atılmaktadır. Atılan su miktarı gazbetonda %50 civarında olmaktadır. Burada 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 emme kapasitesini belirlemektedir. Yapı malzemelerinde su emme kapasitesi toplam boşluk miktarına yaklaştığı oranda, malzeme donmaya karşı hassas duruma gelmekte, ayrıca nemin etkisi ile ısı yalıtım özelliğini de kaybetmektedir. Gazbeton malzemenin, suya doygun durumdayken dahi, bünyesindeki boşlukların yaklaşık %60'ının kuru kaldığı belirtilmektedir.

Buhar geçirgenlik: Gazbeton, gözenekli yapısı sayesinde düşük bir buhar geçirgenlik direncine ($p=5-7$) sahiptir. Bu özellik, malzemenin yapıda rahatlıkla nefes almasını sağlamaktadır. Ancak, özellikle don bölgelerinde gazbeton duvarın çıplak (korumasız) bırakıldığı durumlarda, bu özelliğin malzemenin bünyesine büyük zarar verebildiği gözlemlenmiştir [27].

Donma-çözülme: 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 genişleyebileceği 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 [14].

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 [23].

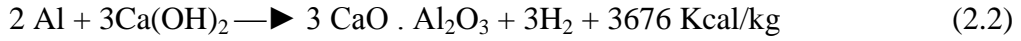
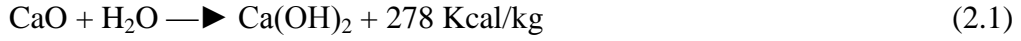
Ses yutma: Malzeme yüzeyine çarpan ses enerjisinin bir kısmı yapı elemanının malzeme cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak yutulmakta, kalanı ise yansıtılmaktadır. Yutulan ses enerjisinin yüzeye gelen ses enerjisine oranı, ses yutma katsayısı olarak ifade edilmektedir. Katsayının 1'e yaklaşması ile 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 [28,30].

2.1.2.2. Gazbetonun Kimyasal Özellikleri

Sönmemiş kirecin su ile reaksiyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit, metalik alüminyum tozu ile kirecin sönmesinden meydana çıkan kimyasal enerjiyle reaksiyona girerek hidrojen gazı çıkışı meydana gelir [29].

Alüminyum tozu ise metalik pulvarize alüminyum tozudur. Gazbetona gözenekli yapıyı kazandıran, hidrojen gazı çıkışı için kullanılan girdidir ve üretimde saf alüminyum tozu kullanılır [29].

Gazbetonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar üç aşamada gerçekleşir [28].



Burada ilk reaksiyon sönmemiş kirecin su ile birleşimi ile başlar. İkinci reaksiyon ise ilk reaksiyondan ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin alüminyum ile reaksiyonu gerçekleşir. Bu reaksiyon ile çıkan hidrojen gazı kabarma ve gözenek oluşumu sağlar. Üçüncü ve son aşamada ise otoklavda yüksek basınç ve sıcaklık altında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda gazbetonda en çok rastlanan tobermorit (C-S-H) kristalleri oluşur [29].

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 [22].

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 uğrattırlar. 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 [6].

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 [28].

2.1.2.3. Gazbetonun Mekanik Özellikleri

Gazbetonun basınç dayanımına etki eden faktörle arasında şekil ve boyutu, boşluk oluşturma yöntemi, yükleme yönü, beton yaşı, su muhtevası, kürleme yöntemi yer alır. Bunun yanında hava gözeneklerinin gözenek yapısı, gözenek kabuklarının mekanik durumu basınç dayanımını doğrudan etkiler. Genellikle gözeneklerin azalması ve yoğunluğun artması nedeniyle basınç dayanımı yoğunluk artışıyla lineer olarak artar [6]. Gazbetonun elastisite modülü, basınç raporlarında, basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak formüle edilir [22].

Çizelge 2.4. Ticari gazbetonun mekanik özellikleri [17].

Malzeme mukavemet sınıfı	G2		G3		G4	
Ortalama basınç dayanımı (kgf/cm²)	25		35		50	
En yüksek kuru birim hacim ağırlığı (kg/m³)	400	500		600		700
Isı iletkenliği (W/mK)	0,15	0,17		0,20		0,23
Elastisite modülü (kgf/cm²)	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 [6].

Basınç mukavemeti: Gazbeton basınç mukavemeti, kuru birim hacim ağırlığına ve içerdiği nem miktarına bağlıdır. Çizelge 2.5’de belirtildiği gibi TS EN 679’e göre gazbeton malzemelerin basınç mukavemeti küp deneyine göre belirlenir. Bu deneyde, malzemenin basınç mukavemeti 10x10x10 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 [6].

Çizelge 2.5. Gözenekli beton yapı malzeme ve elemanlarının sınıfları [16].

Sınıfı	En Büyük Basınç Dayanımı kg/cm² (MPa)	En Küçük Basınç Dayanımı kg/cm² (MPa)	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	Ortalama Birim Hacim Ağırlığı (kg/m³)	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 [28].

2.1.3. Gazbetonun Sağladığı Avantajlar

Gazbeton, betondan 13, delikli tuğladan 2-4 kez daha fazla ısı yalıtımı özelliğine sahiptir. Bu nedenle; ilk tesis masraflarından ve yapı ömrünce yakıttan önemli tasarruf sağlar. Gazbeton ile yapı yazın serin, kışın sıcak olur. Gazbetonda ısı yalıtımını sağlayan unsur, küçük gözenekler arasında sıkıştırılmış havadır. Hacminin %84'ü kuru havadan oluşan ve kuru hacim ağırlığı 400 kg/m³, doğal olarak başta hiçbir yalıtım malzemesine gerek duymadan ısı yalıtımı sağlayan bir yapı malzeme ve elemanıdır [6].

Hafiftir; betondan ve tuğladan daha hafif olan gazbeton, nakliye, demir ve çimento konusunda sağladığı önemli oranlardaki tasarrufun yanı sıra yapı ağırlığının azalması nedeni ile yapının depreme karşı daha dayanıklı olmasını sağlar .

Kolay işlenebilir; Beton sınıfına girmesine karşın ahşap gibi testere ile rahatlıkla kesilebilen gazbeton, matkapla delinebilmekte, çivi çakılabilmekte ve tesisat kanalları kolaylıkla açılabilir.

Isıya Dayanıklısıdır; Gazbetonun 1200°C'ye kadar ısıya dayanıklılığı, yangından korunmayı da sağlamaktadır.

Isıtma – Soğutma Tasarrufu; Betondan ve tuğladan daha çok ısı yalıtımı sağlayan gazbeton, yapıların ısıtma – soğutma ilk yatırım ve kullanım giderlerinden tasarruf sağlar.

Hava kirliliğini Önler; gazbeton ısı ve enerji tasarrufu sağlayan özelliğı ile havanın daha temiz kalmasını sağlar

Çevrecidir; Hammadde olarak silisli kum kullanılmaktadır. Tarıma elverişli toprak kullanılmadığından dolayı da çevreye zarar vermemektedir.

Dayanıklısıdır; Basınç Dayanımı 75 kg/cm²'ye kadar ulaşmaktadır. 60 x 25 x 20 cm boyutlarındaki bir adet gaz beton 22–75 ton yük taşır.

Boyutlarda Hassasiyet; Gaz Beton en son teknoloji sayesinde milimetrik boyutlarda kesilebilme özelliğı nedeni ile ürünün düzgün yüzey ve kenara sahip olmasını sağlar.

Kolay Sıvanır; Gaz Beton yüzeyleri yeterince pürüzlü olduğundan sıva tutar. Rötne değeri 0,5 mm/m den azdır.

2.1.4 Gazbetonla İlgili Bazı Standartlar

- TS 771-4 Kâgir Birimler - Özellikler - Bölüm 4: Gazbeton kâgir birimler
- TS EN 12602 Önyapımlı Donatılı Gazbeton Yapı Elemanları
- TS802 Beton Karışım Hesap Esasları
- TS EN 679 Gaz ve Köpük Beton-Basınç Mukavemeti Tayini
- TS EN 680 Gaz Beton- Kuruma Büzülmesi Tayini
- TS ISO 8302 Isı Yalıtımı - Kararlı Halde Isıl Direncin Ve İlgili Özelliklerin Tayini - Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı
- TS EN 678 Gaz ve Köpük Beton-Kuru Yoğunluk Tayini

- TS EN 989 Gaz Beton- Donatı Çubuklarının Aderans Davranışının Sıyırma Deneyi ile Tayini
- TS EN 991-1356 Gaz Beton veya Hafif Agregalı Gözenekli Beton- Ön yapımlı Donatılı Bileşenlerin Yanal Yükler Altında Performans Deneyi
- TS EN 992 Hafif Agregalı Gözenekli Beton-Kuru Yoğunluk Tayini
- TS EN 1351 Gaz Beton-Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini
- TS EN 1352 Gaz Beton veya Hafif Agregalı Gözenekli Beton- Basınç Altında Statik Elastisite Modülü Tayini
- TS EN 1353 Gaz Beton-Rutubet Muhtevası Tayini
- TS EN 1355 Gaz Beton veya Hafif Agregalı Gözenekli Beton-Basınç Altında Sünme Tayini
- TS 3289 EN 1354 Gözenekli Beton-Hafif Agregalı-Basınç Mukavemeti Tayini

2.2 Uçucu Kül

Pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'den meydana gelen, EN 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 [30].

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 [6].

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin; A.B.D.'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 Standartları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını hazırlayarak yayınladı. Devlet Su İşleri 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 [4].

Bu gün Dünya'da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır. Türkiye'de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermektedir. Bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon kadar olmakta, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir [4].

Her endüstriyel atık gibi uçucu külden de yararlanma olasılıkları araştırılmıştır. Bunların başında çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması gelir. Silindirle sıkıştırılmış betonlarda, beton blok ve boruların yapımında kullanım bulur. Çimento hammaddesi olarak kullanılabilir. Özel işlemlerle uçucu külden dayanıklı hafif agrega elde edilebilir. Diğer kullanım alanları arasında: beton ve asfalt yollarda, yol temel tabakalarında filler olarak, zemin stabilizasyonunda, kireç-kumtaşı blokların, endüstriyel seramik ve refrakterlerin, boyaların üretiminde, katı atıkların stabilizasyonunda ve bitki yetiştirilmesinde kullanımları sayılabilir [33].

Çizelge 2.6. Uçucu küller ile ilgili Türk standartları

Standard No	Standardın Adı	Açıklama
TS EN 197-1	Uçucu Küllü Çimento	Fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ve deney metotları
TS EN 450-1 +A1	Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1	Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri
TS EN 450-2	Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 2	Uygunluk değerlendirmesi
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 özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıkları gösterir. Genellikle silisi ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi artırır; ayrıca hidrasyon ısısını azaltır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külde kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği gösterirler [4].

2.2.1 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. [4].

Birçok ülke standardında uçucu küllerin sınıflandırılması yer almamakla birlikte, ASTM C618 nolu standart, uçucu külleri F ve C sınıfı olarak iki grupta değerlendirmektedir [34].

Çizelge 2.7. ASTM'ye Göre Uçucu Kül Sınıflandırılması

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.

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 [35,36].

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.

2.2.2 Uçucu Külün Özellikleri

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

Çizelge 2.8. Uçucu külün özellikleri (TS EN 197-1)

Özellikleri	Standart Sınırları (%)
MgO	≤ %5
SO ₃	≤ %5
Rutubet	≤ %3
Kızdırma kaybı	≤ %10

Çizelge 2.9. Uçucu külün özellikleri (ASTM C618).

Özellikleri	F Ağırlıkça (%)	C Ağırlıkça (%)
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ %70	≥ %50
MgO	0	0
SO ₃	≤ %5	≤ %5
Rutubet	≤ %3	≤ %3
Kızdırma kaybı	≤ %12	≤ %6

2.2.2.1 Uçucu Külün Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin tane boyutları termik santraldeki kül toplama yöntem ve elemanlarına bağlıdır. Siklonlarda toplanan küller, elektro filtrelerde toplananlardan daha iri tanelidirler. Uçucu küllerin renkleri açık bejden kahverengiye, griden siyaha kadar değişik tonlarda olabilir. İçindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça uçucu küllerin rengi koyulaşmaktadır [37].

Uçucu kül taneleri genellikle küresel şekilli katı parçacıklardır. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır. Uçucu kül taneciklerinin boyutları 1 - 150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2,1 – 2,7 (ortalama 2,4) g/cm³ yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. Daha çok miktarda karbon içeren küller koyu gri renkte, daha çok demir içerenler ise açık gri renktedir [38].

Bir termik santralden elde edilen uçucu küllerin tane dağılımı eğrileri zaman içinde kömür kaynağında kömür öğütme yönteminde termik santral projesinde büyük değişiklikler olmadığı surece sabit kabul edilmektedir. İnceliğin özgül yüzey cinsinden ölçülmesi, Portland çimentoları ve UK'lar için pratik ve anlamlı bir yöntemdir. Çeşitli araştırmalarda uçucu küllerin özgül yüzeylerinin 1800-5000 cm²/gr arasında değiştiği görülmüştür. Pratik oluşu nedeniyle sıkça kullanılan bir başka yöntem ise ASTM No 325 eleğinin üzerinde kalan miktarın bulunmasıdır. Ayrıca hidrometre analizi, azot absorpsiyonu ve X ısınları sedimantasyonu gibi yöntemlerde uçucu küllerin inceliğin bulunmasında kullanılmaktadır [39].

Uçucu küllerin fiziksel özellikleri Çizelge 2.10'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 elektro filtrelerde veya siklonlarda tutulma hassasiyetleridir. Sistemi terk eden küller ne kadar iyi yakalanırsa, o oranda ince taneli küller elde edilmektedir. Elektro filtrelerde daha ince uçucu küller tutulabildiği için, elektro filtrelerde tutulan uçucu küllerin tane boyutu, siklonlarda tutulandan daha küçüktür [40].

Çizelge 2.10. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri [5].

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

Türk uçucu küllerinin yığın 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, yığın yoğunluğu ve özgül ağırlık da artmaktadır. Önemli yoğunluk farkları ise muhtemelen duvar kalınlıklarına, boşluk hızına ve parça çapının dağılımlarını etkilemektedir. Düşük yığın 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 2.11'de çeşitli uçucu küllerin yığın yoğunlukları ve özgül yüzey alanları görülmektedir [41].

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 Fe₂O₃ olduğunu göstermiştir [42].

Çizelge 2.11. Türkiye'deki uçucu küllerinin yoğunluk dağılımı ve özgül yüzey alanları [41].

Uçucu kül	Yığın 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	0,118
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

2.2.2.2 Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO olup, diğerleri SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir. Genelde bir taş kömürü uçucu külü, linyit uçucu külünden daha fazla toprak alkali metalleri içermektedir. Temel oksitler olan SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ ve CaO'ın miktarları, uçucu külün silisi veya kireçsi yapıda olmasına göre değişmektedir. Buna göre, uçucu külde SiO₂ %25-60, Al₂O₃ %10-30, Fe₂O₃ %1-15 olarak ve CaO %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır [33].

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

düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10-15 arasında değişmektedir [35].

Çizelge 2.12. Türkiye'deki uçucu küllerin kimyasal oranları [5].

Mineral	Uçucu Kül					
	Afşin-Elbistan (%)	Çatalağzı (%)	Seyitömer (%)	Soma B (%)	Tunçbilek (%)	Yatağan (%)
Mullit	1,0	18,1	1,2	4,3	8,8	6,0
Kuvartz	4,5	10,9	5,6	5,1	13,9	22,4
Manyetit	0,8	0,2	2,5	0,6	4,1	2,9
Hematit	4,0	0,1	6,0	2,0	3,0	7,0
Anhidrit	12,2	-	9,3	7,4	-	-
Serbest	18,6	0,7	5,5	9,8	0,9	1,0
Plajiyoklaz	28,0	-	15,0	20,0	-	25,0
AmorfFaz	30,0	70,0	50,0	50,0	70,0	35,0

TS EN 450'ye göre betonda kullanılacak uçucu küllerdeki SO₃ ve serbest kireç miktarları sırası ile %5 ve %1'den küçük olması gerekmektedir. Bunlardan SO₃ fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genleşmesi (aktif alümina ve SO₃'den etrenjit oluşumu) serbest kireç ise hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak, betonda genleşme ve çatlaklara neden olabilmektedir. Uçucu küllerde kızdırma kaybı esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan bağlanmamış su veya CO₂ kaybını da içine almaktadır. İyi yakılmayan kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olmaktadır [9].

Uçucu küllerde çok az miktarda nem de bulunabilmektedir. Nem miktarı fazla olan uçucu küller, kullanıcının işini zorlaştırdığından, ASTM C618'e göre uçucu küllerdeki nem miktarının %3'den fazla olmaması gerekir [34].

2.2.2.3 Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri

Uçucu külün mineralojik bileşimi, kömürde bulunan minerallere (kil, kuvars, pirit, alçıtaşı, karbonatlar) (Ca, Mg, Fe) ve proses koşullarına (kömür hazırlama ve yanma gibi) bağlıdır. Uçucu külün mineralojik yapısı, külün tipine göre değişen dağılımda olmak üzere, camsı (kristalsız) ve kristal yapıli bileşenlerden oluşmaktadır [9].

Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik bileşimleri arasında doğrudan bir ilişki bulunmamasına karşın, mevcut ulusal ve uluslararası standartlarda yalnızca kimyasal oksit analizi kullanılarak bu malzemelerin kullanılabilirliği belirlenmektedir. Oysa uçucu küllerin reaktivitesi mineralojik yapılarıyla ilgilidir [43].

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, SiO₂ 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 [4].

Yüksek kireçli külde ise, aktif bileşen içinde silisyum da içeren kalsiyum alüminat camsı fazının yanı sıra aktif kristalize fazlardır (serbest kireç, anhidrit, kalsiyum alüminat gibi). Burada, saf silika camı, Ca ve Al iyonları ile modifiye olmuştur. Bu faz bir bakıma cüruftaki yapıya da benzemektedir. %20'nin üzerinde CaO içeren küllerde kalsiyum alüminat camsı fazı 12CaO.7Al₂O₃ bileşimindedir. Yüksek kireçli külün camsı ve kristalize fazları, külün puzolanik özelliğın yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahip olmasını sağlamaktadır [44].

Düşük kireçli uçucu küldeki yüksek silisli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde, yavaş olarak reaksiyona girerken, yüksek kireçli küldeki kalsiyum alüminosilikat camsı fazı su ile reaksiyona girerek bağlayıcı fazları oluşturur. Bu nedenle yüksek kireçli uçucu külün camsı fazının düşük kireçli den daha az, ancak daha reaktif olduğu bilinmektedir [45].

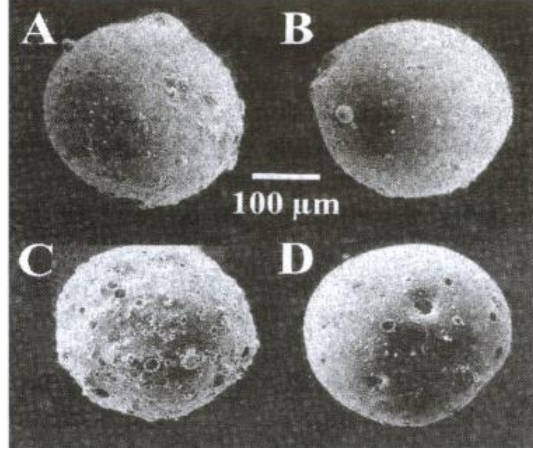
Yüksek kireçli küllerdeki kristalize fazlar (anhidrit, serbest kireç gibi), külün kendiliğinden bağlayıcı olmasına katkıda bulunmakla birlikte, standarttaki sınırlar, aşıldığı takdirde SO₃ fazlalığı ileri yaşlarda betonda sülfat genişmesi (aktif alümina ve SO₃'den etringit oluşumu), serbest kireç ise hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) oluşturarak betonda genişme ve çatlak oluşumuna sebep olmaktadır. Yine yüksek kireçli uçucu külde bulunan alüminat bileşimindeki gehlenit de, külde yüksek SO₃ olduğunda reaksiyona girmekte, buna karşılık düşük kireçli küldeki kristalize faz olan mullit, alüminat bileşiminde olduğu halde inert bileşen olarak kalmakta; dolayısıyla sülfat genişmesine yol açmamaktadır [4].

2.2.2.4 Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri

Tanecik morfolojisi (şekli) ve büyüklük dağılımında, kömürün orjini ve uniform olması, kömürün pulverizasyon durumu, yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi tipi gibi prosese bağlı faktörler etkili olmaktadır [44].

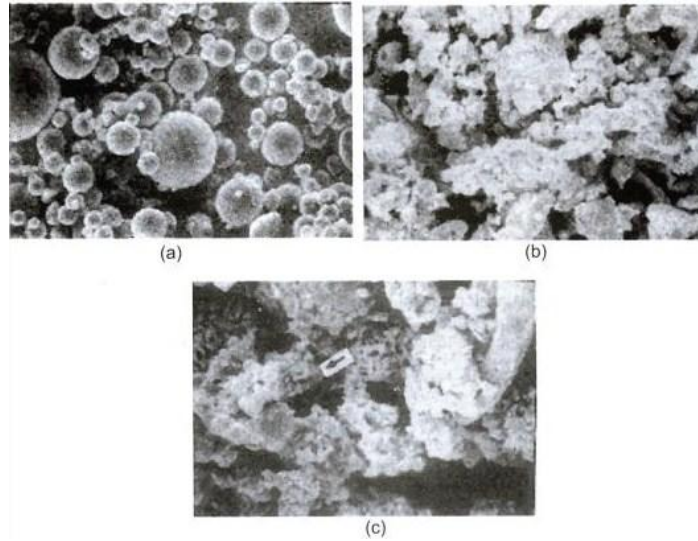
Uçucu külde büyüklükleri 0.5µm - 150µm arasında değişen hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır. Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere), boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres), büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış (dermasphere) deforme yapılar, yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir. Bu durum Şekil 2.7'de görülmektedir [4].

Küresel olmayan tanecikler, kömürden gelen ve yanma reaksiyonlarına katılmamış mineraller (kuvars, feldspatlar gibi), düzensiz şekilli ve gözenekli yapılardan(kil kalıntıları, yanmamış karbon gibi) oluşmaktadır [4].



Şekil 2.7. Uçucu kül taneciklerinin morfolojik yapısı a) Yüzeyinde birikintiler ve sıvı damlaları olan küresel tanecik, b) Camsı küresel tanecik, c) Yüzeyi düzensiz boşluklar içeren tanecik, d) Boşluklu küresel tanecik [4].

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 [46,4].



Şekil 2.8. Uçucu kül tipleri a) Yüksek silisli uçucu kül (pulverize uçucu kül) (b) ve (c) Yüksek kireçli uçucu kül [4].

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun 40 µm'nin altında olması (10- 20 µm) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler, yüzey alanları büyük olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler. Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır [4].

2.2.3 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. Uçucu küllerin inşaat sektöründe Çizelge 2.13'de görüldüğü gibi farklı alanlarda kullanılabilir [5].

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidrasyon ısısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin ABD' de ilk kullanım 1940'lı yıllarda önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verildi ve Türk Standartları Enstitüsü uçucu kül (TS 639) ve uçucu küllü çimento (TS 640) standartlarını hazırlayarak yayınlamıştır [4].

Türkiye'de uçucu kül kullanımına ait detaylı veriler bulunmamakla birlikte genellikle çimento ve tuğla üretimi ile baraj yapımında kullanıldığı görülmektedir [43].

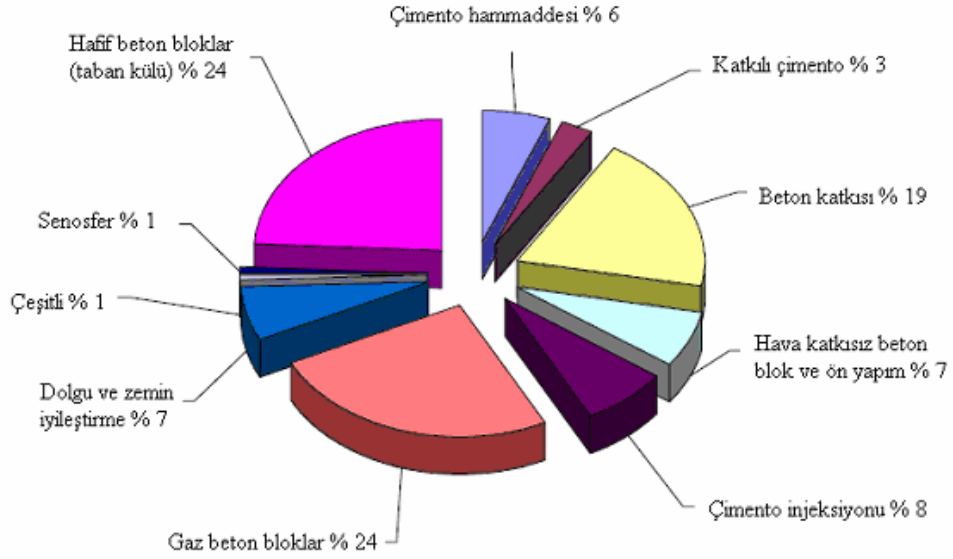
Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandı.

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 [4].

Çizelge 2.13. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanıldığı alanlar [5].

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 yapıları uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral, geoteknik uygulamalar

Avrupa'da inşaat sektöründe uçucu kül kullanımına örnek olarak İngiltere'deki durum Şekil 2.9'de gösterilmiştir. İngiltere'de uçucu külün ağırlıklı olarak beton, hafif beton blok ve gaz beton blok üretiminde kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 2.9. İngiltere’deki termik santrallerden elde edilen uçucu küllerin kullanım alanları [5].

2.2.4. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan uçucu küllerin beton özelliklerine olumlu ve zararlı etkileri aşağıda sıralanmıştır [38].

Olumlu etkileri:

- Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır.
- Taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır.
- Betonun hidrasyon ısısını azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.
- Sertleşmiş betonun sülfatlara dayanıklılığını artırmaktadır.
- Ekonomiklik sağlamaktadır.

Potansiyel zararlı etkileri:

- Betonun prizini birazcık geciktirmektedir; bu durum, soğuk havalarda sorun olabilmektedir.

- Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır.
- Betonun daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmektedir.
- Betonda belirli miktarda sürüklenmiş hava elde edebilmek için daha çok miktarda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılmasını gerektirmektedir.

Betonda uçucu kül kullanımı önemli birçok avantaj sağlar. Uçucu küllerin kullanımıyla elde edilebilecek yararlar yalnızca çevre koruma ve enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Betonda kullanıma uygun bir uçucu kül betonun daha ekonomik ve daha uzun ömürlü performans düzeyi sağlamasına sebep olur. Betonda katkı maddesi olarak uçucu kül kullanımının özellikle kütle yapılarında daha pratik ve ekonomik olduğu çeşitli kaynaklarda belirtilmiştir. Özellikle kütle betonlarında çimentonun ağırlıkça %20–25 oranında uçucu küle değiştirilebileceği belirtilmektedir. Uçucu külün ince agrega yerine kullanıldığı karışımlarda ise %25 katkı oranının uygun olacağı belirtilmiştir. Uçucu külün çok düşük oranda kullanılması halinde betonda alkali-agrega reaksiyonlarına yol açabileceği de çeşitli araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [37].

Sabit bir çökme değeri elde edebilmek için uçucu küllü beton karışımının ihtiyacı olan su miktarı, genellikle, katkısız betonunkinden daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %20–30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacında yaklaşık %7 oranında daha az su kullanıldığı görülmüştür [44].

Kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için, daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır. Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır [38].

Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış ve uçucu kül taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları, taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir. Bazen, betondaki çimentonun azaltılan bölümü yerine kullanılan uçucu küle ek olarak, ince agreganın

bir bölümünün yerine de uçucu kül kullanılmaktadır. Bu tür betonların pompalanabilirliği daha da artmaktadır [38].

Uçucu küllü betonların kısa süreli dayanımları olumsuz etkilenmektedir. Bunun yanında düşük oranlarda uçucu kül kullanılması durumunda ise uçucu kül bulunmayan şahit betonlara göre uzun süreli dayanımları artış göstermekte ve betonlarda kılcal su geçirimsizliği azaltmaktadır [47].

2.2.5. Uçucu Külün Çimento Özelliklerine Etkileri

Uçucu küller çimentoya ham madde olarak, klinker ve alçı taşı ile birlikte öğütülerek veya mamul çimentoya doğrudan olmak üzere üç şekilde katılabilir. Bu tip çimento üretiminde, klinkere öğütülmüş uçucu kül katıldığından klinkerin öğütülmesi kolaylaşmakta, üretim kapasitesi ve rantabilite artmaktadır. Uçucu küller öğütülmüş kömürün yakılmasıyla elde edildiklerinden kendileri de öğütülmüş durumdadır. Bundan dolayı çimento üretiminde bir ön öğütme işlemine gerek kalmadan doğrudan fırına verilebilirler ve böylece öğütme işleminden tasarruf sağlanır [48].

Çimentoya, ince öğütülmüş uçucu kül ikamesi ile üretilen betonların olumlu kimyasal reaksiyon gerçekleştirerek geçirimsizliklerinin arttığı ve klor geçirimsizliğinin önemli oranda azaldığı saptanmıştır [50].

Uçucu küllü puzolanik çimentoların öğütülme süreleri, normal çimentolara göre daha kısa sürmekte ve bu çimentoların 28 gün sonundaki dayanım değerleri, uçucu kül ikameli çimento harçlarına göre daha yüksek olmaktadır. Portland çimentosuna uçucu külün ikame edilmesiyle çimentonun hidratasyonu gecikmekte böylelikle çimentonun priz başlama süresi artarak betonun erken dayanımı düşmektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla Na_2SO_4 ve CaCl_2 gibi kimyasal aktivatorler kullanılabilen ve bu kimyasallar puzolanik reaksiyonu hızlandırarak uçucu kül ile serbest kirecin arasındaki reaksiyonu değiştirmektedir. Yapılan bir çalışmada, %40-60'a kadar değişen oranlarda uçucu kül içeren çimentoya, %3'lük Na_2SO_4 katkısı yapılarak hidratasyonun hızlandırıldığı belirtilmiştir [49].

2.2.5. Uçucu Külün Gazbeton Yapımında Kullanımı

Gazbetonda uçucu kül, çimentodan çok, ince kum ikamesi olarak kullanılır. Amerikan Gazbeton Üreticileri Birliği, uçucu külün gazbetonda %75 oranına kadar kullanılmasını önermektedir [11].

Holt vd., (2005) tarafından yapılan çalışmada, burada muhtemelen uçucu kül puzolanik özelliğe sahip olması nedeniyle kireç ile reaksiyona girerek mikro yapıyı güçlendirici yeni bağlar ürettiği belirtilmiştir. Koyu gri veya siyaha yakın atığın gazbeton üretimine katılması nihai ürün rengini koyulaştırdığı veya gri renge çevirdiğini belirtmişlerdir [12].

Narayanan vd. (2000) hidratasyon ürünlerinin yapısını, uçucu kül katkının gözenek oluşumuna etkisini ve boşluk matris ara yüzeyindeki geçiş zonunu araştırdıkları çalışmada; karışım oranlarındaki farklılıkların (kum/uçucu kül oranı) ve uygulanan kür yöntemlerinin (buhar kürü/otoklav kürü) gazbetonun mikroyapı özelliklerini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Yapıları itibari ile kum ve uçucu kül malzemeli gazbetonlar zamanla gelişen hidratasyon derecelerine bağlı olarak dikkate değer farklılıklar göstermekte olduğu, başlangıçta sadece çimento hidrate olurken, arkasından nispeten daha yavaş biçimde uçucu külde hidrate olduğunu belirtmektedirler [13].

Kunhanandan Nambiar vd. (2006)'ne göre, gazbetonda, belirli bir yoğunluk için kumun uçucu kül ile yer değiştirmesi (uçucu kül ikamesi) mukavemette artış sağlamaktadır. Çimento-kum karışımına göre, çimento-uçucu kül karışımı örnekler nispeten daha yüksek su emme oranına sahip olduğunu belirtmektedirler [14].

Kearsley vd. (2000)'nin yaptığı, araştırmalar göstermiştir ki, çimentonun %60'a kadar uçucu kül ile ikamesi çimento pastasının özelliklerini geliştirmektedir. Uçucu külün çimento ile yüksek oranlarda (%75'e kadar) yer değiştirmesi sonucu köpük betonun basınç mukavemetinde dikkate değer artış elde edilmiştir [15].

3. MALZEME ve METOT

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Kuvars Kumu

Gazbeton üretimi için üretim için gerekli malzemelerden kuvars kumunun belirli bir incelikte olması ve içerisindeki silis oranının yüksek olması istenir. Ayrıca içerisindeki kil oranının düşük olması gerekir. Maden ocağından getirilerek stok edilen kuvarsit ve alçıtaşı birinci ve ikinci kırıcıda kırılmak üzere %85'i kuvarsit, %15'i alçıtaşı oranında karıştırılarak bunkere dökülür. Birinci ve ikinci kırıcıdan geçen karışım, bilyalı değirmende su ikame edilerek 90 µm incelik değerine gelene kadar öğütülerek çamur bunkerine girecek hale getirilir.

Çizelge 3.1. Gazbeton prosesine uygun bir kuvarsit veya silis kumunun kimyasal bileşimi

Oksit	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
Miktarı (%)	min %78	max %3	max %7	max %15	max %2	max %1	max %1

Çalışmada kullanılan kuvarsit AKG Gazbeton İşletmeleri San. ve Tic. A.Ş.' e ait Kırşehir-Boztepe ocak sahasından temin edilmiştir ve kimyasal analiz verileri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan Kırşehir Boztepe yöresi kuvarsitin kimyasal analizi

SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
89,717	-	2,091	1,119	1,138	0,188	0,117	1,055

3.1.2. Uçucu Kül

Bu çalışmada kullanılan uçucu kül Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Bu külün çalışmalarımızda kullanılmak üzere seçilmesinin amacı; TS EN 197-1, ASTM C 618 standartlarında istenilen kimyasal bileşen sınırlarına uygunluğu ve içerdiği SiO₂ yüksek olmasındandır. Çatalağzı Termik Santrali uçucu külü ile ilgili kimyasal analiz sonuçları, mineralojik ve morfolojik analiz sonuçları aşağıda açıklanmıştır.

3.1.2.1. Uçucu Külün Kimyasal Özellikleri

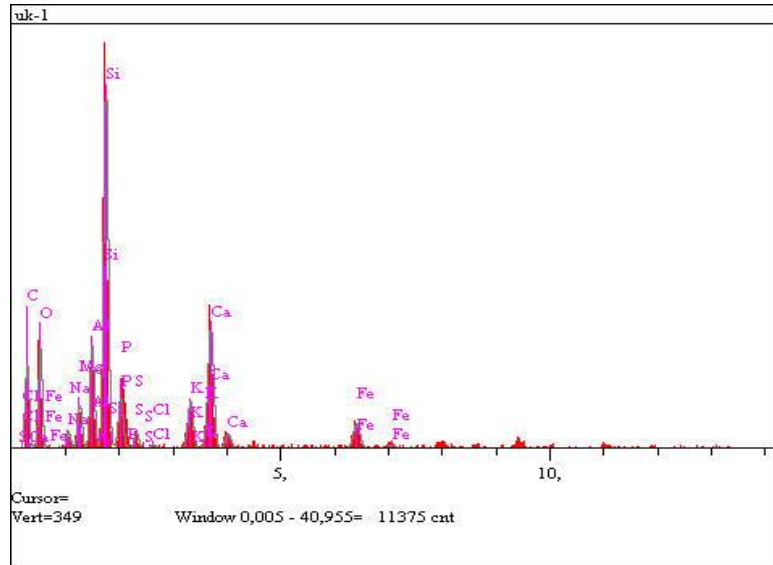
Çalışmada ana hammadde olan uçucu külün kimyasal, fiziksel ve mineralojik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Uçucu külün kimyasal analizi XRF cihazı ile gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar çizelge 3.3'de gösterilmiştir. Uçucu külde bulunan toplam SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ oranı toplam %82,61 olarak elde edilmiştir. Uçucu külün bileşiminde Gazbeton üretiminde zararlı olabilecek oranda bileşiğe rastlanmamıştır.

Çizelge 3.3. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

Oksit	Oranı (%)	Oksit	Oranı (%)
SiO ₂	43,25	SrO	0,11
Al ₂ O ₃	20,72	ZrO ₂	0,09
Fe ₂ O ₃	18,65	Cr ₂ O ₃	0,07
K ₂ O	8,20	Rb ₂ O	0,07
CaO	3,55	ZnO	0,04
TiO ₂	2,31	CuO	0,04
SO ₃	1,48	Y ₂ O ₃	0,02
BaO	1,21	NbO	0,01
MnO	0,21	Toplam	100,00

Çatalağzı uçucu külü, reaktif kireç miktarının %10'un altında olması nedeniyle, TS EN 197-1'de verilen V sınıfı (silissi uçucu kül) kapsamına girmektedir. SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarı ortalama, %82,61 olup ASTM C 618'e göre %70'in üzerinde ve CaO'in %10'dan az olması (%3,553) nedeniyle F sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir [34, 35].



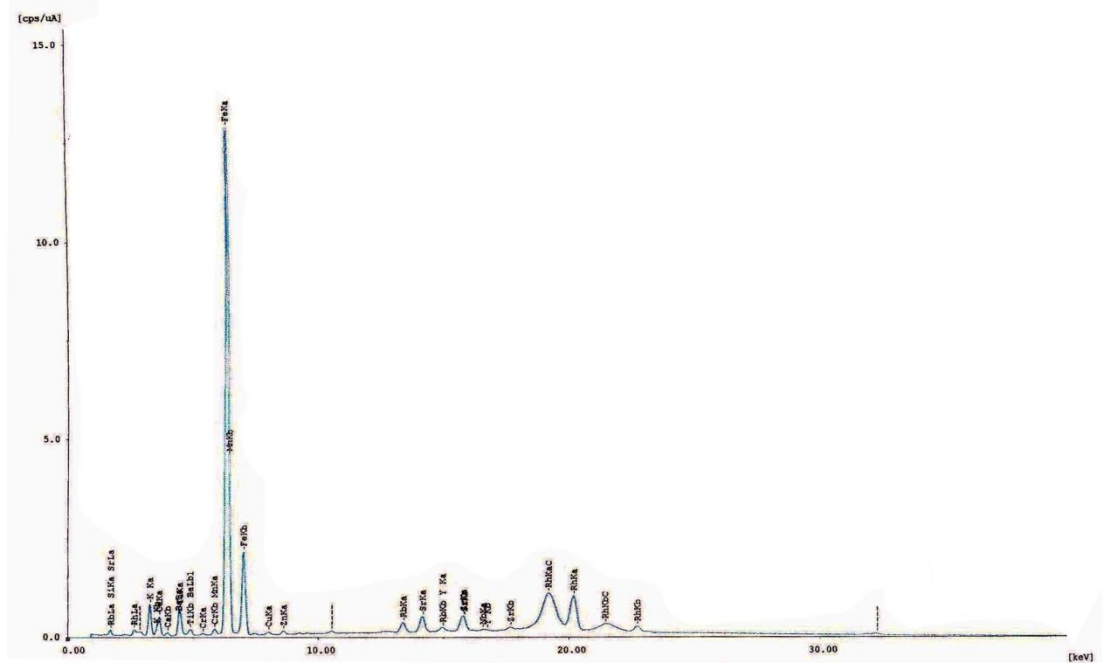
Şekil 3.1. Çatalağzı uçucu külünün EDS analizi

Çizelge 3.4. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçlarına göre standartlara uygunluk sınırları ve sonuçların değerlendirilmesi

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit %	Uçucu Kül	TS EN 450	TS EN 197-1		TS 639	ASTM C 618	
			V	W		F	C
SiO ₂	43,25						
Al ₂ O ₃	20,72						
Fe ₂ O ₃	18,65						
S+A+F	82,61				>70,00	>70,00	>50,00
CaO	3,55						
MgO	0				<5,00		
SO ₃	1,48	<3,00			<5,00	<5,00	<5,00
BaO	1,211						
MnO	0,206						
KK	0	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<5,00	<6,00
CI	0	<0,10					
Serb.CaO	0.25	<1,00					
Reak SiO	32.15	>25,00	>25,00	>25,00			
Reak.CaO	0,88		<10,00	>10,00			

3.1.2.2 Uçucu Külün Mineralojik Özellikleri

Çatalağzı termik santrali uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

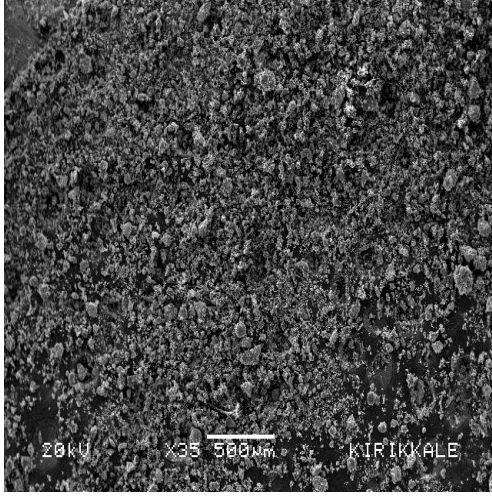


Şekil 3.2. Çatalağzı uçucu külünün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı

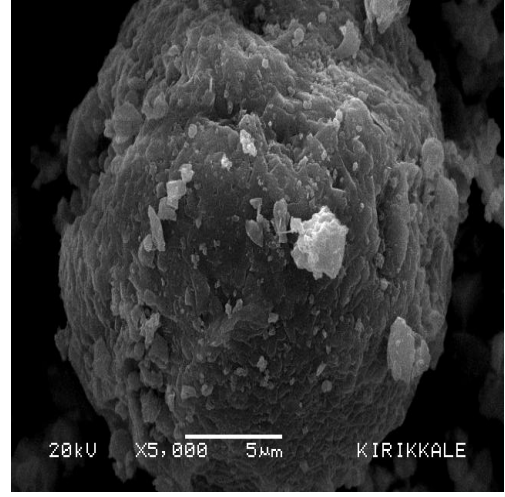
Buna göre camsı ve az oranda kristal fazlardan oluştuğu görülmektedir. Kristalize fazlar kuvars, mullit, biyotit (mika grubu) ve hematit' den meydana gelmektedir.

3.1.2.3. Uçucu Külün Morfolojik Özellikleri

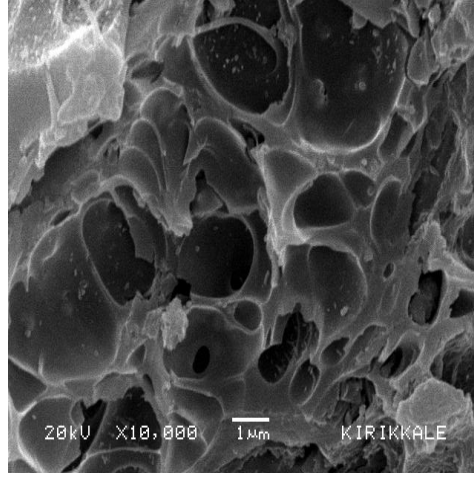
SEM ile yapılan incelemeler sonucunda uçucu kül içerisindeki silika küreciklerinin boyutlarının 1 ile 25 µm arasında değiştiği gözlenmiştir. Küreciklerin şekillerinin çoğunun düzensiz boşluklar içerdiği, bazı kürelerin ise kristalizasyon şartlarına bağlı olarak küresellikten uzaklaştığı ve gözenek içerdiği gözlenmiştir (Şekil 3.3.).



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.3. Çatalağzı uçucu külünün yüzey yapısına ait SEM görüntüleri

(a) 35 kat büyütme

(b) 5000 kat büyütme

(c) 10000 kat büyütme

3.1.3. Çimento

Karışımlarda Yibitaş Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.'den alınan Çimpor marka CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerinin,

TS EN 197- 1 ve TS EN 197- 2’de belirtilen standart değerlere uygun olduğu grlmtir [35,36]. Çimentonun fiziksel özellikleri izelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan çimentonun fiziksel zellikleri

TÜR	90 µ elek üstü (%)	32 µ elek üstü (%)	zgl yüzey alanı (cm ² /g)	Priz başlangıcı (dk)
	Max. 2	Max. 30	Min. 2800	Min. 60
CEM 1	0,1	18	3759	130

3.1.4 Kireç

Çalışmada Akyüz Kireç Sanayi Ltd. Őti.’den alınan kireç kullanılmıştır. Kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri izelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan kirecin zellikleri

Fiziksel görünüm	Beyaz toz veya granül
Renk	Beyaz
Koku	Kokusuz
CaO (%)	94,75
Kızdırma Kaybı (%)	3,21

3.1.5 Alçı Taı

Çalışmada kullanılan alçı taı Kılıçoğlu Alıtaı Nakliye ve Tic. Ltd. Őti.’den temin edilmiştir. Alçı taşının fiziksel ve kimyasal analizleri izelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Deneyde kullanılan alçı taşının fiziksel ve kimyasal özellikleri

TÜR	Fiziksel Görünüm (μm)	Kızdırma Kaybı (%)	Bağlı Su (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)
	Max. 500	Max. 6	17 - 24	Min. 38	26,5 - 32
Alçı Taşı	450	2,04	18,96	42,09	29,50

3.1.6. Alüminyum Tozu

Alüminyum toz halinde alındığından bir işleme tabi tutulmaz direkt olarak su ile alüminyum süspansiyonunu hazırlanarak üretim de kullanılır. Alüminyum tozunun büyüklüğü 45-60 mikron arasındadır ve solunum yoluyla kolayca vücuda kanserojen bir etki yaratabilmektedir ve yanıcıdır [29].

Çalışmada kullanılan alüminyum tozu AKG Kırıkkale Gazbeton Fabrikasından elde edilmiştir. Gazbeton üretimde yaklaşık olarak alüminyum ve karışım suyu 1/3,75 oranında karıştırılarak alüminyum süspansiyon yapılmıştır.



Şekil 3.4 Deneyde kullanılan alüminyum süspansiyon görünümü

3.1.7. Su

Gazbeton üretiminde AKG Gazbeton İşletmeleri San. ve Tic. A.Ş.'ne ait Kırıkkale Gazbeton Tesislerinde üretimlerinde arıtılarak kullandıkları kuyu suyu kullanılmıştır.

3.2. Metot

Çalışmada, duvar elamanı olarak kullanılan ve ticari olarak üretimi yapılan G2/04 sınıfı gazbeton üretimi baz alınarak, Çatalağzı Termik Santralinden alınan uçucu kül, hammadde olarak kullanılan kuvars kumu yerine %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek 6 farklı seride gazbeton örnekleri üretilmiştir. Burada ikame oranlarının bu şekilde seçilmesinin nedeni; ana malzemenin toplam SiO₂ oranının minimum %75-78 arasında olması istendiğinden dolayıdır [29, 59]. Çizelge 3.8.'de deneyde kullanılan ana malzemedeki toplam SiO₂ oranı verilmiştir.

Çizelge 3.8. Deneyde kullanılan ana malzemedeki toplam SiO₂ oranı

Karışımındaki Ana Malzeme SiO₂ Oranı				
Seriler	Kuvarsit (kg)	Uçucu Kül (kg)	Toplam Hammadde (kg)	Hammadde SiO₂ Oranı (%)
UK0	168	0	168	89,72
UK5	160	8	168	85,25
UK10	151	17	168	82,89
UK15	143	25	168	80,79
UK20	134	34	168	78,43
UK25	126	42	168	76,33

Deneyde kullanılan tüm malzemelerin karışım oranları Çizelge 3.9'da verilmiştir. Numune kabı olarak 15x25x20 cm boyutlarında deney setleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.9. Deneyde kullanılan malzeme ve 1 m³ karışım oranları

Karışım Oranları (1m³)								
Seriler	Uçucu Kül İkame Oranı (%)	Kuarsit (kg)	Uçucu Kül (kg)	Çimento (kg)	Kireç (kg)	Alçı Taşı (kg)	Su (kg)	Al. (kg)
UK0	0	168	0	91	31	29	262	0,55
UK5	5	160	8	91	31	29	262	0,55
UK10	10	151	17	91	31	29	262	0,55
UK15	15	143	25	91	31	29	262	0,55
UK20	20	134	34	91	31	29	262	0,55
UK25	25	126	42	91	31	29	262	0,55



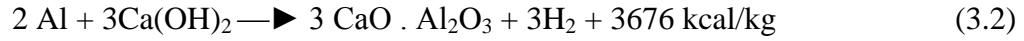
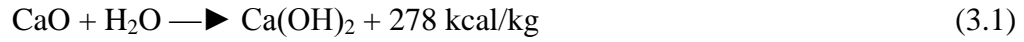
Şekil 3.5. Deneyde kullanılan malzemelerin tartılması

Karışımları hazırlarken önce uçucu kül, kuvars kumu ve alçı bir kaba konularak karışım suyunun 1/3'ü eklenmiştir, çimento ve kireç ayrı bir kaptaki karıştırıldıktan sonra bu karışıma ilave edilmiş ve üzerine geri kalan 2/3 oranındaki suyu ekleyerek homojen karışım haline gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra belirli miktar suyla karıştırılarak pasta haline getirilen alüminyum süspansiyonu hazırlanan karışıma eklenerek karıştırılmıştır. Akıcı bir kıvamına gelen gazbeton harcı kalıp yağı ile yağlanmış numune kaplarına dökülmüştür.

Burada alüminyum süspansiyonunun karışıma en son eklenmesinin nedeni karışıma eklendiği anda reaksiyona başlamış olmasından dolayıdır.

Alüminyum süspansiyonu eklenmesi ile alüminyum-kireç tepkimesi gerçekleşir ve gazbeton karışımı genişlemeye başlar [23].

Gazbetonun geçirdiği kimyasal reaksiyonlar üç aşamada gerçekleşir [28].



Burada ilk reaksiyon sönmemiş kirecin su ile birleşimi ile başlar. İkinci reaksiyon ise ilk reaksiyondan ortaya çıkan kalsiyum hidroksitin alüminyum ile reaksiyonu gerçekleşir. Bu reaksiyon ile çıkan hidrojen gazı kabarma ve gözenek oluşumu sağlar. Üçüncü ve son aşamada ise otoklavda yüksek basınç ve sıcaklık altında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda gazbetonda en çok rastlanan tobermorit kristalleri oluşur [29].



Şekil 3.6. Hammaddelerin karıştırılması



Şekil 3.7. Karışımın numune kaplarına dökülmesi



Şekil 3.8. Deney numunelerinin buhar küründe kabarması

Yapılan numuneler dinlenme kısmına alınarak 60 °C sıcaklıkta 4 saat buhar küründe bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Hatta verilen numuneler hızlı bir şekilde genişmeye ve priz almaya başlar. Yaklaşık 30 dakika içinde gelişen reaksiyonlar sonucu açığa çıkan hidrojenin oluşturduğu baloncuklar sonucu kabaran, kısmen katılaşmış gazbeton bloğu oluşur.

Buradan alınan numuneler otoklavlarda doymuş buhar ile 11 bar basınç ve 180 °C sıcaklıkta yaklaşık 6,5 - 7 saat doymuş buhar kürüne tabi tutulur. Buhar küründen çıkan ürünler, hafif, gözenekli ve yüksek basınç dayanım özeliğine sahip olur.



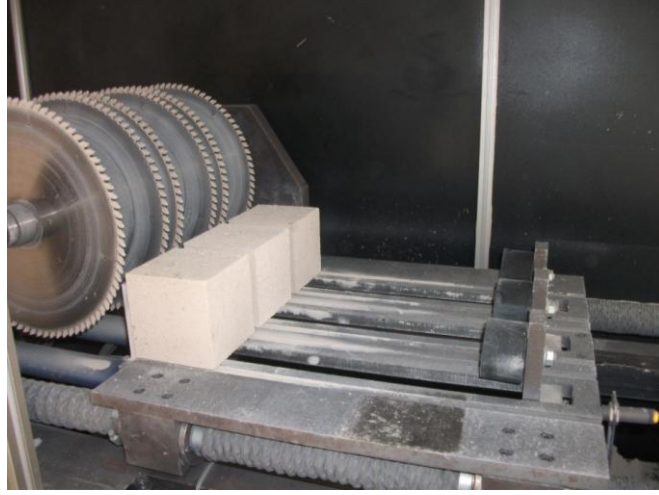
Şekil 3.9. Otoklavdan çıkan deney numuneleri

3.2.1. Fiziksel ve Basınç Dayanım Özelliklerin Belirlenmesi

Üretilen gazbeton örneklerinin basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, rutubet muhtevası belirlenmiş, ısı iletkenlik deneyi yapılmış ve SEM ve EDS analizlerine bakılmıştır.

3.2.1.1. Basınç Dayanımı

Deney numuneleri TS EN 679 standardına göre hazırlanıp, basınç dayanımı deneyine tabii tutulmuştur. Basınç dayanımı deneyinde 100x100x100 mm ebatlarında; hazırlanan her bir gruptan 1 adet olmak üzere toplam 6 adet deney numunesi kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyi AKG Kırıkkale Gazbeton Fabrikası Laboratuvarında bilgisayar destekli deney cihazı ile yapılmıştır [55].



Şekil 3.10. Numunelerin basınç dayanımı için boyutlandırılması

Basınç dayanımı deneyinde, Otoklavdan çıkan numuneler basınç dayanımının yapılması için Şekil 3.10.'de görünen makine ile 100x100x100 mm ebatlarına getirildi. Boyutlandırılan deney numuneleri, 60 °C'lik etüvde bir gün bekletildikten sonra etüvden çıkartılarak ortam sıcaklığına kadar soğuması için kadar yaklaşık 2 saat bekletilmiştir. Bu süre sonunda numune, basınç deneyini yapmak üzere test cihazına Şekil 3.11'deki gibi yerleştirilir.



Şekil 3.11. Basınç deneyinin yapılması

Deney sırasında yük, kabarma yönüne dik olarak uygulanmıştır. Gerilme artışı, 0,05 N/mm²/sn olacak şekilde sabit bir hızla, sürekli ve darbesiz olarak numune kırılıncaya kadar yüklenmiştir. Deney numunesinin taşıyabildiği en büyük gerilme 0,01 N/mm² hassasiyette okunmuştur. Diğer numunelerinde aynı şekilde basınç dayanımı deneyi yapılarak, elde edilen basınç dayanımları ve taşıyabildiği en büyük yük bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir.

Örneklerin basınç dayanım değerleri Denklem 3.4.'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$f_i = A_i / F_i \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3.4.)$$

Burada:

f_i : N/mm² cinsinden basınç dayanım değeri

A_i : yük uygulanan kesitin mm² olarak alanı

F_i : Kırılma anındaki maksimum yük

3.2.1.2. Kuru Yoğunluk

Deney numuneleri TS EN 678 standardına göre hazırlanıp, kuru yoğunluk değerleri bulunmuştur. Deney numuneleri, 105 °C'lik etüvde sabit kütleyle gelinceye kadar bekletilmiş ve daha sonrasında hassas terazi ile ağırlıkları tartılarak kaydedilmiştir. Aynı şekilde boyutları kumpas ile ölçülerek kaydedilmiştir [54].



Şekil 3.12. Numunelerin etüvde bekletilmesi

Örneklerin kuru yoğunluk değerleri denklem 3.5'den yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$\rho_i = m_i / V_i \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.5.)$$

Burada:

ρ_i : kg/m^3 cinsinden kuru yoğunluk değeri

m_i : deney numunesinin kuru kütlesi

V_i : deney numunesinin hacmi

3.2.1.3. Rutubet Muhtevası

Deney numuneleri TS EN 772-10 standardına göre hazırlanıp, rutubet muhtevası değerleri bulunmuştur [56].

Otoklavdan çıkan deney numunelerini kurutmadan önce yaş ağırlıklarını tespit etmek amacı ile tartılmış ve yoğunluğu bulunmuştur. Daha sonra numuneler, hava dolaşımli etüv içerisinde $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, sabit kütleye ulaşınca kadar kurutulmuş ve yoğunluğu bulunmuştur.

Örneklerin rutubet muhtevası değerleri denklem 3.6'dan yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$\mu = \rho_1 - \rho_2 / \rho_2 \quad (3.6)$$

Burada:

- μ : Rutubet muhtevası oranı, kütlece (%),
- ρ : deney numunesinin yaş yoğunluğu
- ρ_2 : deney numunesinin kuru yoğunluğu

3.2.1.4. Isı İletkenlik Deneyi

Isıl iletkenlik deneyi TS ISO 8301 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney numunelerinin ısı iletim katsayılarının (λ) ölçülmesinde Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan “Lasercomp Fox 314” ısı iletkenlik cihazından yararlanılmıştır.

Numuneler ortalama 35 mm kalınlığında 300mmx300mm ebatlarında hazırlanarak ısı iletkenlik deneyine tabi tutulmuştur.

Cihaz 0,05–10 W/mK aralığında ısı iletim katsayısını ölçebilmektedir.



Şekil 3.13. Isıl İletkenlik deneyinin yapılması

3.2.1.5. SEM ve EDS analizi

Deney numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizi Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Laboratuvarları Müdürlüğü Elektron Mikroskobu Laboratuvarında bulunan Jeol JSM5600 marka 30 kV'luk Taramalı Elektron Mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde ilk önce numuneler altın kaplanarak SEM için yüzey hazırlanmış ve tarayıcı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope) ile örneklerin SEM görüntüleri kullanılarak elde edilirken, 35 büyütme yapılarak EDS analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.14. Jeol JSM5600 cihazı elektron mikroskobu cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Yapılan çalışmalarda üretilen numunelerden UK0 diye adlandırılan içerisinde uçucu kül bulunmayan (şahit numune) G2/04 sınıfı gazbeton ile Çatalağzı Termik Santralinden alınan ve kuvars yerine %5(UK0), %10 (UK10), %15 (UK15), %20 (UK20) ve %25 (UK25) oranlarında uçucu kül ikameli deney örnekleri üzerinde yapılan kuru birim hacim kütlesi, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, rutubet muhtevası deneyleri yapılmıştır. Ayrıca Jeol JSM 5600 marka 30kV'luk taramalı Elektron Mikroskobu cihazı ile EDS ve SEM görüntüleri incelenerek sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney numunelerinin fiziksel ve basınç dayanım özellikleri

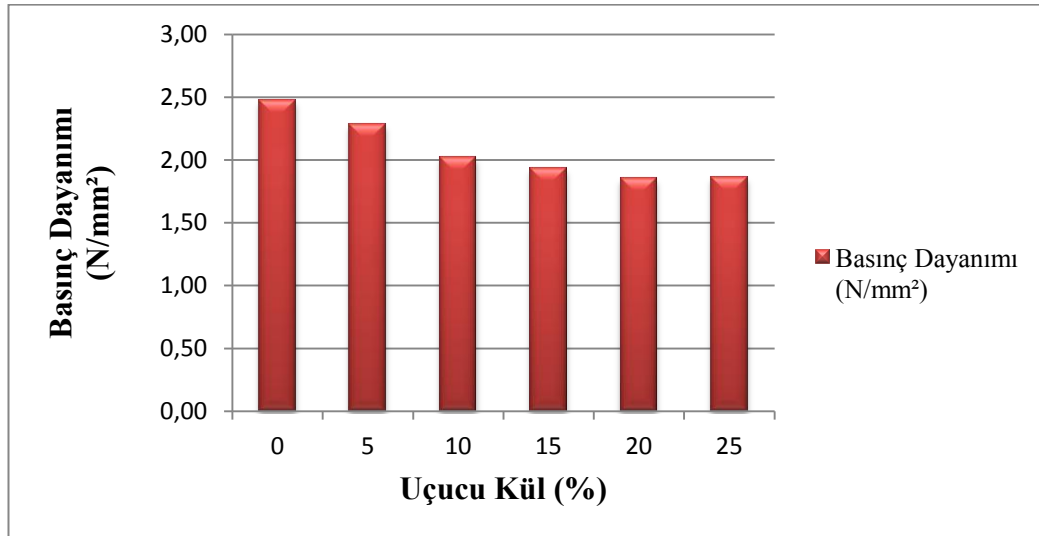
Seriler	Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Rutubet Muhtevası (%)	Isıl İletkenlik (W/mK)
UK0	2,47	406,0	8,37	0,105
UK5	2,28	429,8	8,70	0,095
UK10	2,02	413,5	10,45	0,092
UK15	1,93	420,3	12,10	0,097
UK20	1,85	409,7	13,68	0,098
UK25	1,86	442,4	13,79	0,102

4.1. Basınç Dayanım Özellikleri

Şekil 4.1. ve Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi; Örneklerin basınç mukavemeti değerleri şahit numune (UK0) da 2,47 N/mm² iken uçucu kül ikameli gazbetonlar da ise 2,28 N/mm² ile 1,86 N/mm² arasında değişmektedir. Uçucu kül ikameli gazbeton numunelerde en yüksek basınç dayanımı %5 ikameli UK5 numunesinde bulunmuştur

bu değer şahit numuneye göre yaklaşık %8 daha düşüktür. En düşük basınç dayanımı UK20'de $1,85 \text{ N/mm}^2$ olarak bulunmuştur bu değer de şahit numuneye göre %25 daha düşüktür. Uçucu kül ikameli deney numunelerinin basınç dayanımı şahit numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Basınç mukavemetindeki düşüş %10 uçucu kül ikameli gazbetona kadar daha hızlı iken %10 ile %20 uçucu kül ikameli gazbetonlar arasında daha yavaş olmuştur. Fakat %20'den sonra basınç mukavemetinde küçük bir artış görülmüştür.

Uçucu kül ikamesiyle basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun nedeninin Çizelge 3.8.'de verilen uçucu kül miktarı arttıķa deneyde kullanılan ana malzemedeki toplam SiO_2 miktarının azalmasından dolayı C-S-H kristallerinin oluşumunun azalmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bir başka etkenin de uçucu külün karışımdaki suyun bir kısmını tutmuş olmasından dolayı su çimento oranını bozduğu düşünülmektedir.

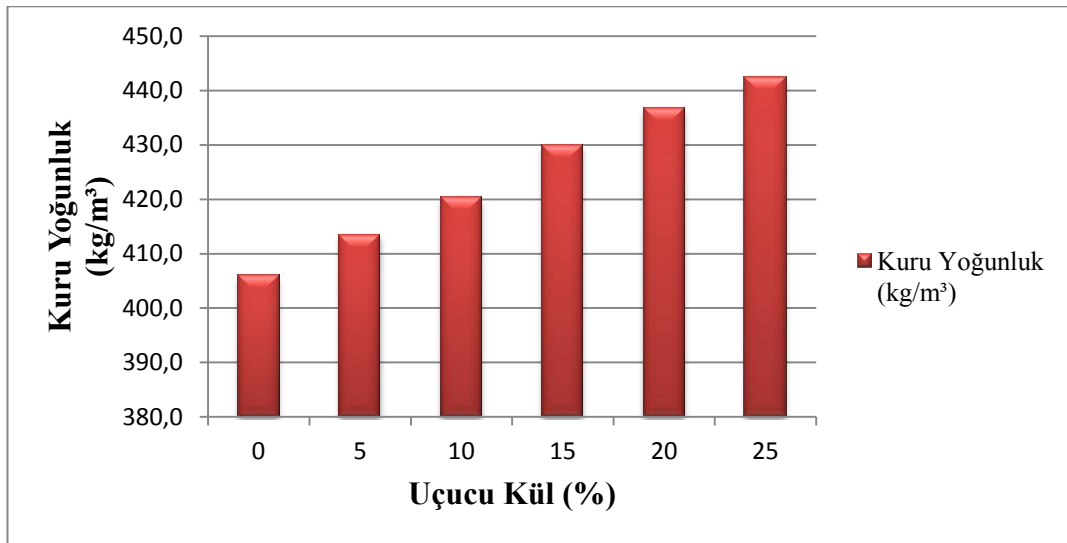


şekil 4.1. Deney numunelerinin basınç dayanımı grafiği

4.2. Kuru Yoğunluk Özellikleri

şekil 4.2.'de ve Çizelge 4.1.'de görüldüğü üzere karışım oranları doğrultusunda yapılan gazbeton deney örneklerin kuru yoğunlukları, şahit numune (UK0) 406

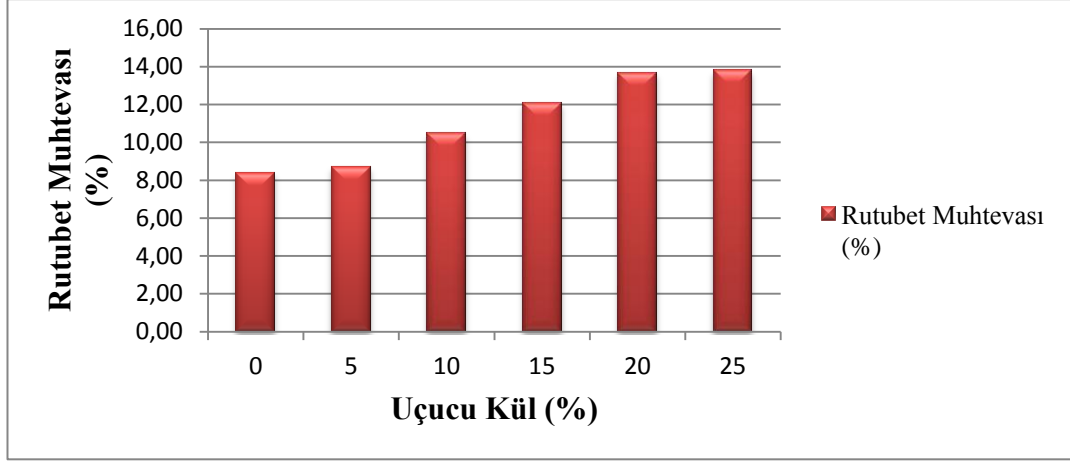
kg/m³ iken, uçucu kül ikameli numuneler de 413 kg/m³ ile 442 kg/m³ arasında değişmektedir. En büyük kuru yoğunluk değeri %25 uçucu kül ikameli UK25’de 442 kg/m³ olarak bulunmuştur bu değer de şahit numuneye göre yaklaşık %9 daha fazladır. Elde edilen değerlere göre tüm numuneler TSE EN 12602’de belirtilen yoğunluk sınıflara göre 450 yoğunluk sınıfına girmektedir [1]. Kuru yoğunluğun uçucu kül ikame oranı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Bununda uçucu külün gazbetondaki boşlukların oluşumunu azaltarak daha boşluksuz bir yapı elde edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Deney numunelerinin kuru yoğunluk değerleri grafiği

4.3. Rutubet Muhtevası

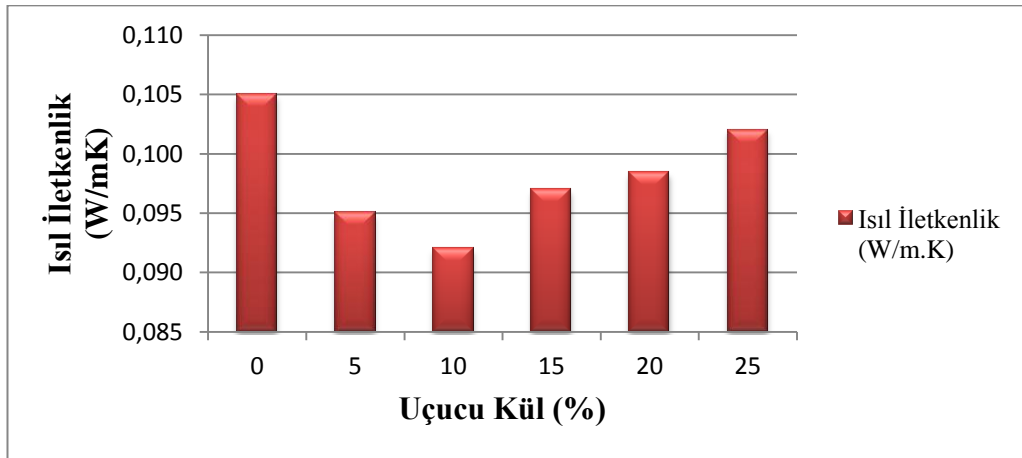
Şekil 4.3.’de görüldüğü gibi, deney numunelerinin TS EN 772-10 standardına göre rutubet muhtevası hesaplanmıştır [56]. Genel olarak uçucu kül ikame oranı ile doğru orantılı olarak rutubet muhtevasının arttığı görülmüştür. Uçucu kül ikame oranına bağlı olarak kapalı boşlukların artması ve artan birim hacim ağırlığının numunelerin içindeki nemin atılmasını zorlaştırmasının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Deney numunelerinin rutubet muhtevası grafiği

4.4. Örneklerin Isıl İletkenlik Özellikleri

Şekil 4.4, ve Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi; örneklerin ısı iletkenlik değerleri 0,095 ile 0,109 W/mK arasında elde edilirken şahit numune UK0 da 0,105 W/mK elde edilmiştir. Uçucu kül ikame oranı %10'a kadar ısı iletkenlik değerlerini düşürmüştür ve %10 uçucu kül ikamesi ile en düşük 0,092 W/mK ısı iletkenlik değeri elde edilmiştir bu değer şahit numuneye göre yaklaşık %13 daha düşüktür. %10 dan daha fazla uçucu kül ikame oranı (%15-%25) ısı iletkenlik değerini arttırmıştır. En yüksek ısı iletkenlik değeri %25 uçucu kül ikameli numunelerde görülmüş bu değer şahit numune değerine yakındır.

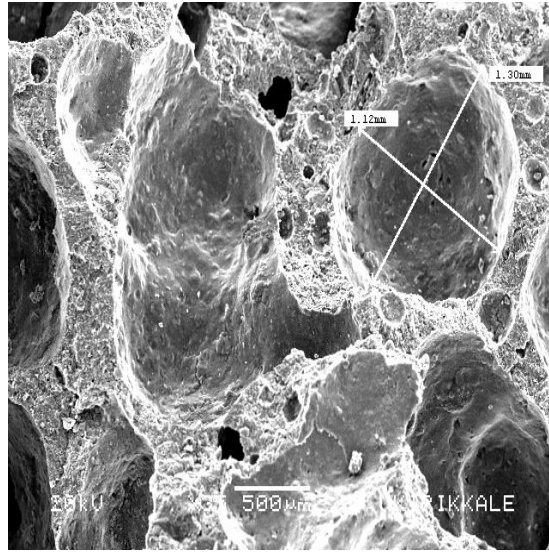


Şekil 4.4. Deney numunelerinin ısı iletkenlik değerleri grafiği

4.5. Mikroyapısal Özellikleri

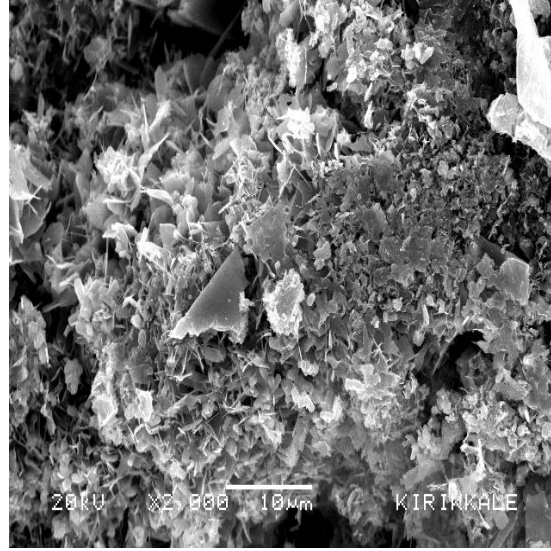
Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Laboratuvarları Müdürlüğü, Elektron Mikroskobu Laboratuvarında bulunan Jeol JSM5600 marka 30kV'luk taramalı Elektron Mikroskobu ile örneklerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri elde edilmiş ve uçucu kül ikameli gazbetonlar da SEM görüntüleri ile mikro yapısal özellikleri değerlendirilmiştir.

Şekil 4.5.'de UK0 olarak tanımlanan şahit numunenin X35 büyütme görünür boşlukların birbirlerinden bağımsız şekilde oluştuğu ve boyutlarının 1-1,5 mm arasında olduğu görülmüştür.

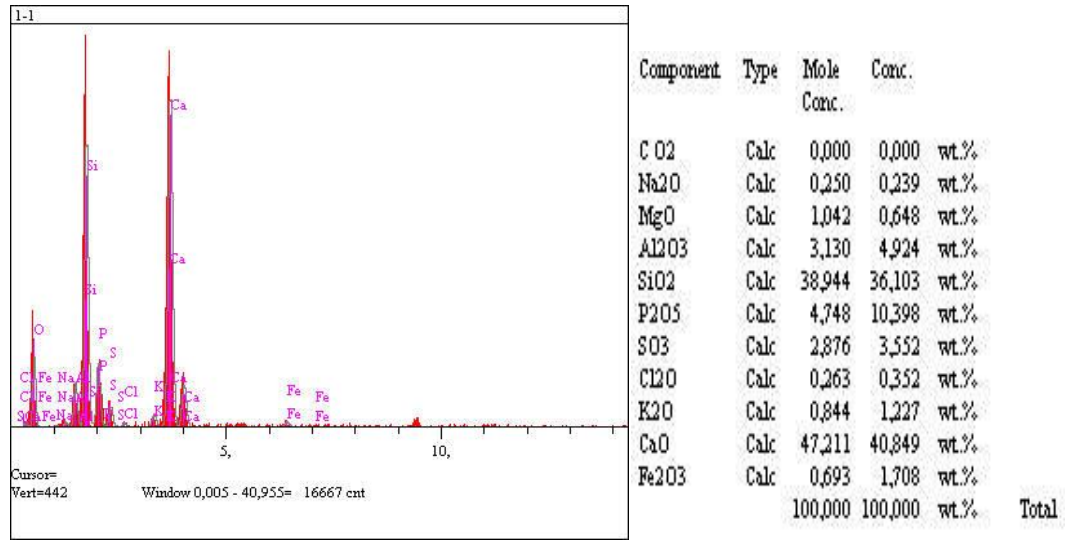


Şekil 4.5. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun SEM görüntüsü (X 35)

Şekil 4.6.'daki şahit numune üzerinde yapılan X2000 büyütmede boşluklu yapı ve yer yer CSH (tobermorit) kristalleri görülmektedir.



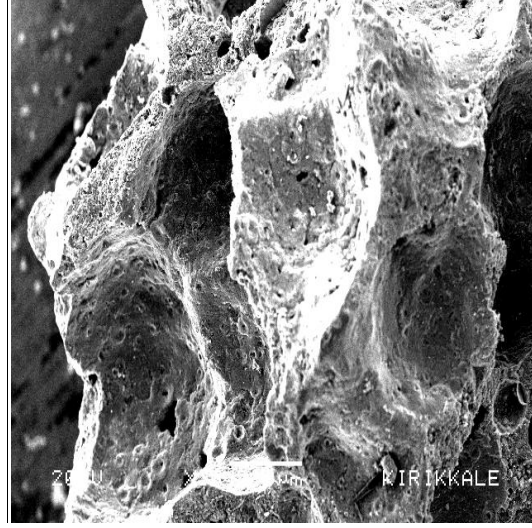
Şekil 4.6. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)



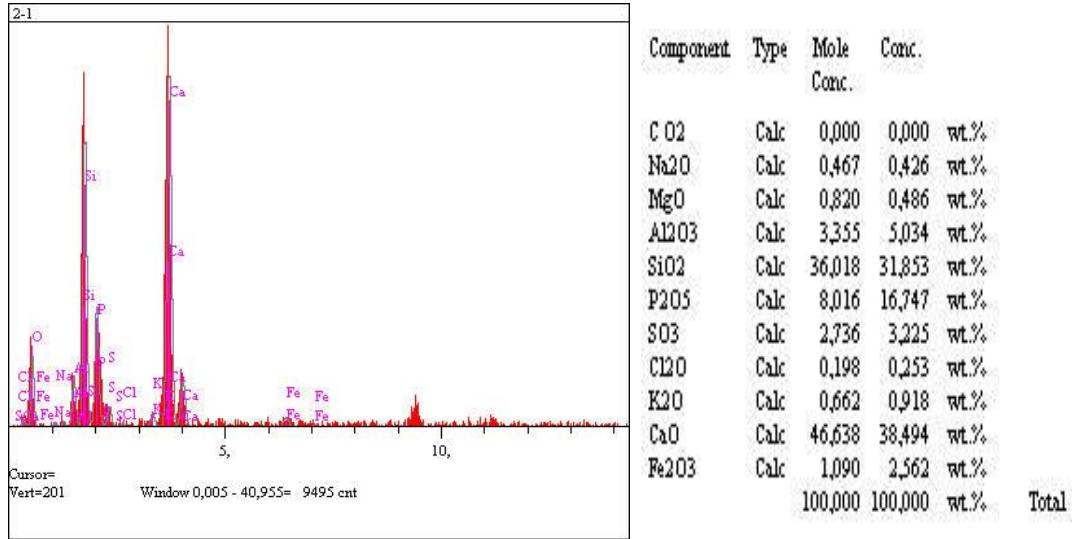
Şekil 4.7. Uçucu kül içermeyen (UK0) gazbetonun EDS analizi

Şekil 4.7.'de gösterilen UK0 olarak tanımlanan şahit gazbeton numunesinin EDS analizinde, kimyasal yapısında %47,211 CaO, %38,944 SiO₂, %4,748 P₂O₅, %3,130 Al₂O₃, %2,876 SO₃, %1,042 MgO olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.8.'de X35 büyütme %10 uçucu kül ikameli gazbetonlarda boşlukların kararsız bir yapıda ve birbirlerinden bağımsız şekilde oluştuğu görülmüştür.



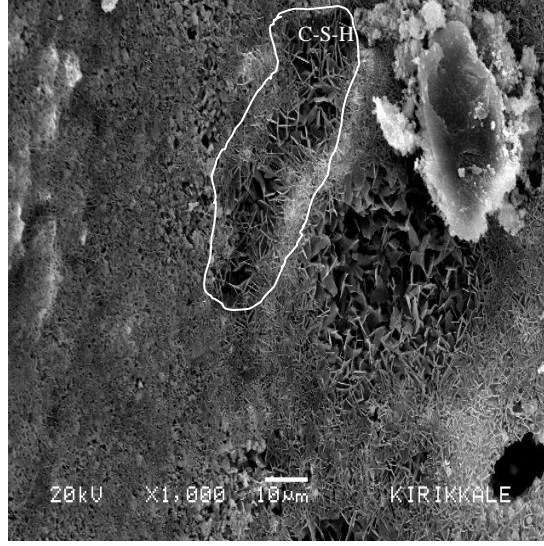
Şekil 4.8. %10 Uçucu kül ikameli (UK10) gazbetonun SEM görüntüsü (X 35)



Şekil 4.9. %10 Uçucu kül ikameli (UK10) gazbetonun EDS analizi

Şekil 4.9.'de gösterilen UK10 numaralı %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun EDS analizinde, kimyasal yapısında %46,638 CaO, %36,018 SiO₂, %8,016 P₂O₅, %3,355 Al₂O₃, %2,736 SO₃, %0,82 MgO olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.10.'daki X1000 büyütmeli %10 uçucu kül ikameli gazbetonlarda 0-10 µm arasında değişen boşluklarla birlikte yer yer CSH (tobermorit) kristalleri görülmektedir.



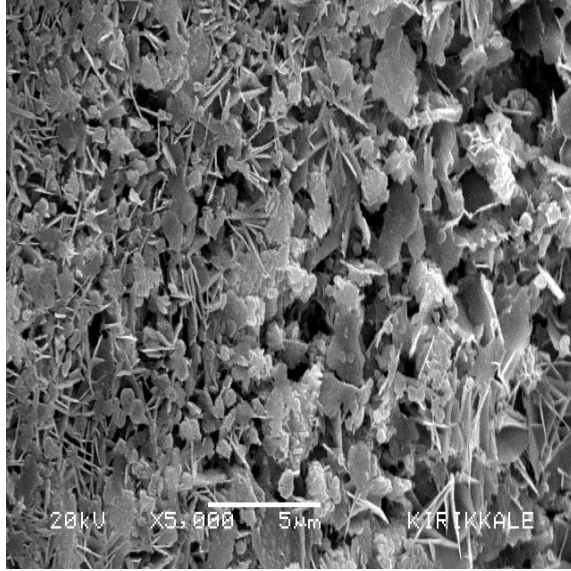
Şekil 4.10. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 1000)

Şekil 4.10.'da CSH kristallerinin bulunduğu bölgede yapılan ve Şekil 4.11.'da X2000 büyütmeli %10 uçucu kül ikameli gazbetonlarda lifsi CSH kristalleri daha yoğun olarak görülmektedir. CSH jelleri 5- 10 µm boyutlarında yoğunlaşmıştır.



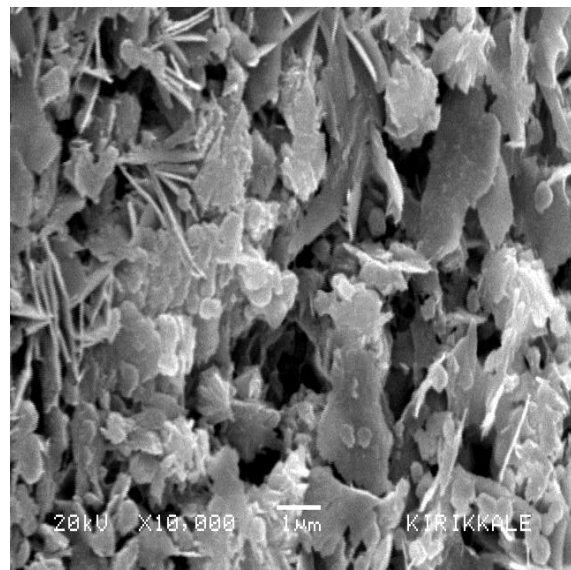
Şekil 4.11. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)

Şekil 4.12.'de X5000 büyütmeli %10 uçucu kül ikameli gazbetonlarda CH ve CSH kristalleri görülmektedir. CSH jelleri 0-5 μm boyutlarında yoğun olarak görülmektedir. Ayrıca boşluklar belirgin olarak görülmektedir.



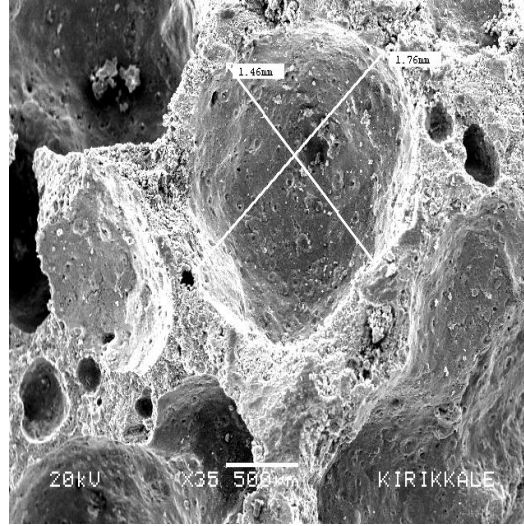
Şekil 4.12. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 5000)

Şekil 4.13.'deki X10000 büyütmeli %10 uçucu kül ikameli gazbetonlarda CSH kristalleri görülmektedir.

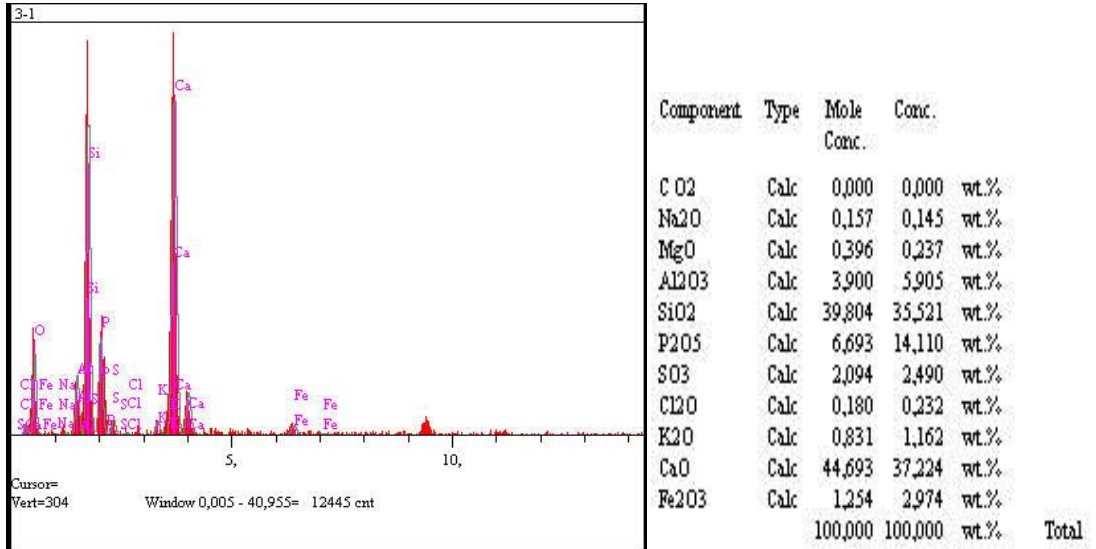


Şekil 4.13. %10 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 10000)

Şekil 4.14.'de X35 büyütmeli %20 uçucu kül ikameli gazbetonda görünür boşlukların birbirlerinden bağımsız şekilde oluştuğu ve boyutlarının 1-2 mm arasında olduğu görülmüştür.



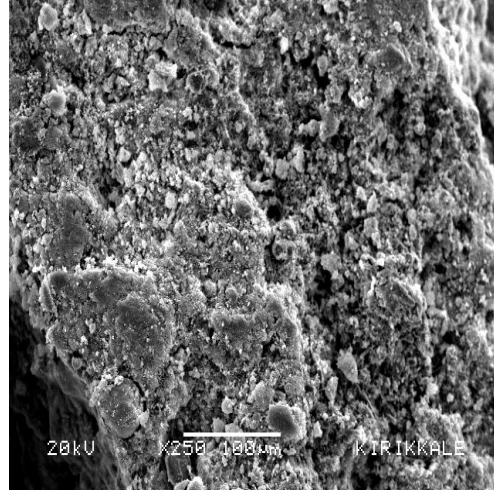
Şekil 4.14. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 35)



Şekil 4.15. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun örneklerinin EDS analizi

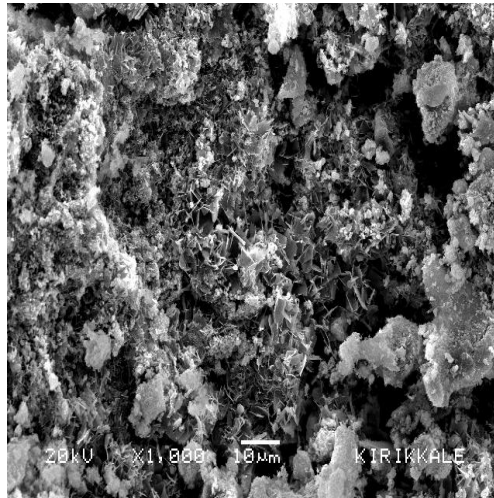
Şekil 4.15.'de gösterilen UK20 numaralı %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun kimyasal yapısında %44,693 CaO, %39,804 SiO₂, %6,693 P₂O₅, %3,900 Al₂O₃, %2,094 SO₃, %0,396 MgO olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.16.'deki X250 büyütme %20 uçucu kül ikameli gazbetonlarda boşluklu yapı daha belirgin şekilde görülmüştür. Bu poroziteler 1-25 µm arasındadır.



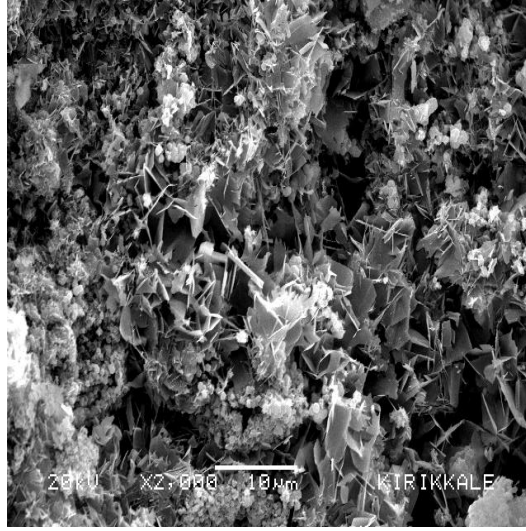
Şekil 4.16. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 250)

Şekil 4.17.'daki X1000 büyütme %20 uçucu kül ikameli gazbetonlarda boşluklar ve CSH ile CH kristalleri daha belirgin görünmekte görülmektedir.



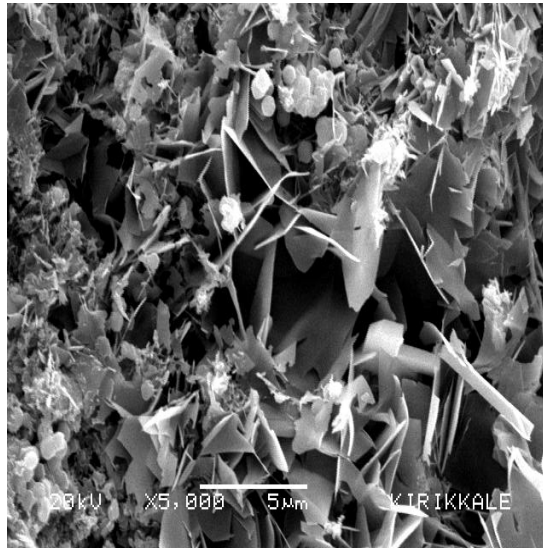
Şekil 4.17. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 1000)

Şekil 4.18.'deki X2000 büyütme %20 uçucu kül ikameli gazbetonlarda CH ve CSH kristalleri görülmektedir. CSH jelleri 5- 10 µm boyutlarında yoğunlaşmıştır.



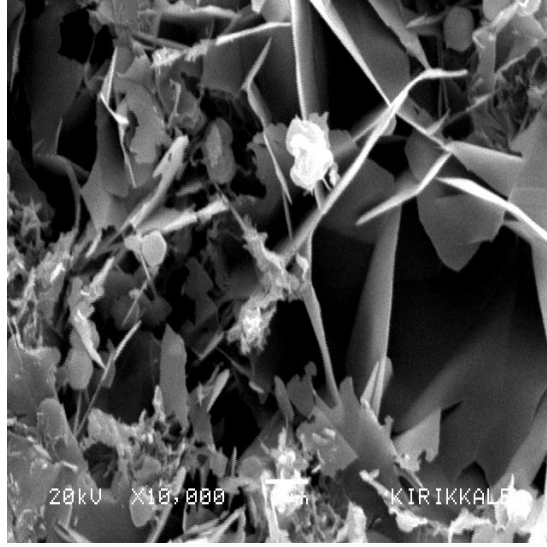
Şekil 4.18. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 2000)

Şekil 4.19.'deki X5000 büyütme %20 Uçucu kül ikameli gazbetonlarda iğnemsiz CSH kristalleri görülmektedir. CSH jelleri 0-5 µm boyutlarında yoğun olarak görülmektedir. Ayrıca boşluklar belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 4.19. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 5000)

Şekil 4.20.'daki X10000 büyütme %20 Uçucu kül ikameli gazbetonlarda boşluklar ve CSH kristalleri görülmektedir.



Şekil 4.20. %20 Uçucu kül ikameli gazbetonun SEM görüntüsü (X 10000)

Şekil 4.20.'da görünen X10.000 büyütme gibi çok büyük büyütmelerde gazbetonun kendisinin boşluklu bir yapıda olmasından dolayı SEM görüntülerinde CH ve CSH kristalleri görülememekte ve boşluklar belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Bu görüntüleri elde etmek için 2000 büyütmenin yeterli olacağı düşünülmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan çalışmalarda içerisinde uçucu kül bulunmayan ticari olarak üretimi yapılan G2/04 sınıfı gazbeton ile Çatalağzı Termik Santralinden alınan ve kuvars yerine %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında uçucu kül ikameli üretilen gazbeton numunelerinde aşağıdaki sonuçlar çıkmıştır;

- Elde edilen numunelerin kuru yoğunluklarında uçucu kül ikamesine orantılı olarak bir artış meydana gelmiş en büyük yoğunluk %25 uçucu kül ikameli gazbetonda görülmüş bu değer şahit numuneye göre %10 daha fazla olmuştur. Yoğunluk açısından çok ciddi farklar olmayıp TS EN 12602 standardına göre tüm numuneler aynı yoğunluk sınıfında (450 yoğunluk) kalmaktadır.
- Genel olarak uçucu kül ikame oranı ile doğru orantılı olarak rutubet muhtevasının arttığı görülmüştür. Uçucu kül ikame oranına bağlı olarak kapalı boşlukların artması ve artan birim hacim ağırlığının numunelerin içindeki nemin atılmasını zorlaştırmasının neden olduğu düşünülmektedir.
- Uçucu kül ikamesiyle basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun nedeninin uçucu kül miktarı arttıkça deneyde kullanılan ana malzemedeki toplam SiO₂ miktarının azalmasından dolayı C-S-H kristallerinin oluşumunun azalmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bir başka etkenin de uçucu külün, karışımdaki suyun bir kısmını tutmuş olmasından dolayı su çimento oranını bozduğu düşünülmektedir.
- Uçucu külün gazbetonda ısı iletkenlik açısından %25 uçucu kül ikamesine kadar olumlu etkisi olduğu söylenebilir.
- Isı iletkenlik değeri %10 uçucu kül ikamesine kadar düşürmüş, %25'e doğru tekrar artış göstermiştir. En düşük ısı iletkenlik değerini %10 uçucu kül içeren numunede görülmüştür.

- Uçucu külün gazbetonda kuvars kumu yerine kullanılmasında basınç dayanımına olumsuz etkisi olduğu fakat bu durumun daha yüksek SiO₂ içeren uçucu kül kullanımı ile telafi edilebileceği düşünülmektedir.
- Bundan sonraki çalışmalarda gazbetona uçucu kül ikamesinin yanında silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi kompoze malzemelerde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] TS EN 12602, Önyapımlı Donatılı Gazbeton Yapı Elemanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.
- [2] Kömürlü R., Önel, H., Gazbeton Yapı Ürünlerinin Konutlarda Kullanımı, YTÜ Mimarlık Fakültesi E- Dergisi, Cilt 2, Sayı 3, Syf 145- 158, İstanbul, 2007.
- [3] Kartal S., Ülkemiz İnşaat Sektöründe Gazbeton Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Ana Bilim Dalı, Edirne, 2001.
- [4] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB, AR-GE, Y03.03, 2009.
- [5] Aruntaş, H., Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyelleri, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt: 21, No: 1, s. 193-203, Ankara, 2006.
- [6] Kozak Ş., Gazbeton Üretiminde Uçucu Külün Hammadde Olarak Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi, Ana Bilim Dalı, Afyon, 2010.
- [7] Özcan, M., Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerinin ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1997.
- [8] Çelik Ç., Gazbeton üretiminde uçucu kül (Çayırhan Termik Santrali uçucu külü) kullanılabilirliğinin araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2005.
- [9] Kara, İ., Seyitömer Uçucu Külünün Farklı Yapı Malzemeleri Olarak

Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2008.

- [10] Güçlüer K., Uçucu külden üretilen silis dumanı katkılı gazbeton örnekleri üzerine kür etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi, Ana Bilim Dalı, Afyon, 2011.
- [11] Autoclaved Aerated Concrete, AAC Products Association, 1999.
<http://netgain.babb.com/aacpa/autoclav.htm>)
- [12] Holt, E., Raivio, P., Use Of Gasification Residues In Aerated Autoclaved Concrete, Cement and Concrete Research 3, 796– 802, 2005.
- [13] Narayanan, N., Ramamurthy, K., Micro Structural Investigations On Aerated Concrete, Cement and Concrete Research 30, 457- 464, 2000.
- [14] E. K. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, Influence Of Filler Type On The Properties Of Foam Concrete, Cement & Concrete Composites 28, 475– 480, 2006.
- [15] Kearsley, E. P., Wainwright, P.J., Porosity And Permeability Of Foamed Concrete, Cement and Concrete Research 31, 805–12, 2001.
- [16] TS 453, Gaz ve Köpük Beton Yapı Malzeme ve Elemanları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1988.
- [17] AKG Gazbeton İşletmeleri San. ve Tic. A.Ş.
www.akg-gazbeton.com (Erişim tarihi: 07.03.2012)
- [18] www.hafifbetonblok.com (Erişim tarihi: 02.03.2012)

- [19] Türkiye Gazbeton Üreticileri Birliği.
www.tgub.org.tr (Erişim tarihi: 05.03.2012)
- [20] Türk Yapı Sektörü Raporu 2010, Yapı Endüstri Merkezi.
<http://www.yapiveri.com/VImages/2012/Arastirmalar/TYSR%202011.pdf>
(Erişim tarihi: 10.10.2012)
- [21] Türk Yapı Sektörü Raporu 2005, Yapı Endüstri Merkezi
<http://www.yapiveri.com/BilgiArsivi/tysr-2005-43.html>
(Erişim tarihi: 10.10.2012)
- [22] Ünverdi A., Yüksek Sıcaklık Altında Gazbeton Kırıklı Betonların Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2006.
- [23] Borhan, B., Ytong El Kitabı- 1, Ytong Teknik Yayınları No:1, İstanbul, 1987.
- [24] Gündüz, L., Pomza Teknolojisi: Pomza Karakterizasyonu, Cilt 2, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Isparta, 1998.
- [25] TS EN 680, Gaz Beton-Kuruma Büzülmesi Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [26] Karagüler, M.E., Isıl İşlem Parametrelerinin Hafif Beton Özelliklerine Etkisi,Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1988.
- [27] Büyükçulha, L., Perlit Katkısının Pişmiş Toprak Malzemenin Mekanik ve Fiziksel Davranışlarına Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1987.
- [28] Çiçek, Y., E., Pişmiş Toprak Tuğla, Bimsbeton, Gazbeton ve Perlitli Yapı Malzemelerinin Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2002.

- [29] Gündoğdu B.C., Gazbeton ve Gazbeton Üretimindeki Bağlayıcı Malzemelerin Rötreye Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2001.
- [30] TS EN 450-1, Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [31] TS EN 450-2, Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 2: Uygunluk değerlendirmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [32] TS 639, Uçucu Küller, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1975.
- [33] Özdemir O., Uçucu Külün Yapı Malzemelerinde Bağlayıcılığa Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [34] ASTM C 618, 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, 1998.
- [35] TSE 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [36] TSE 197-2, 2002, Çimento-Bölüm 2: Uygunluk Değerlendirmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [37] Ünal O., Uygunoğlu T., Soma Termik Santral Atığı Uçucu Külün İnşaat Sektöründe Değerlendirilmesi, Türkiye 14 Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı A.K.Ü, Teknik Eğitim Fakültesi, Afyon, 02-04 Haziran 2004 Zonguldak, 2004.

- [38] Erdoğan, T. Y., Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara, 2007.
- [39] Tokyay, M., Erdoğan, K., Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, Ankara, 1998.
- [40] Toros, H., Afşin – Elbistan Termik Santral Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1987.
- [41] Bayat, O., Characterisation of Turkish Fly Ashes, Fuel, Vol. 77, No. 9/10, pp. 1059-1066, 1998.
- [42] Kolukısa, S., Uçucu Kül İçeren Alüminyum Matrisli Kompozit Üretimi, Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.
- [43] Tokyay, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi), Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, 1993,
- [44] ACI Committee 226, Use of Fly Ash in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1990.
- [45] Mehta, K., Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland-Fly Ash Mixtures, Cement and Concrete Research C.15, No.1, s.669-674, 1985.
- [46] Tikalsky, P.J., ve Carraquillo, R.L., Influence of Fly Ash on Sulfate Resistance of Concrete, ACI Materials Journal, C.89, No.1, s.69-75, 1992.
- [47] Sümer M., F Tipi Uçucu Külün Betonun Basınç Dayanımına Ve Kılcal Su Emmesine Etkileri, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 27-31, 1995.
- [48] Karahan O., Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat

Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana, 2006.

- [49] Görhan, G., Hafif Yapı Blokları Üretiminde Uçucu Külün Kireç Ve Çimento İle Birlikte Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2006.
- [50] Şengül, O. Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R., Yüksek Oranda Uçucu Kül İçeren Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Klor Geçirimsizliği, Besinci Ulusal Beton Kongresi Bildiriler Kitabı, İMO İstanbul Şubesi, İstanbul, 75-85, 2003,
- [51] TS 25, Doğal puzolan (tras)-Çimento ve betonda kullanılan-Tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008,
- [52] TS EN 451-1, Uçucu Kül - Deney Metodları - Bölüm 1: Serbest Kalsiyum Oksit Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [53] TS EN 451- 2, Uçucu Kül - Deney Metodu - Bölüm 2: Islak Eleme ile İncelik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [54] TS EN 678, Gaz ve Köpük Beton-Kuru Yoğunluk Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1995.
- [55] TS EN 679, Gazbeton - Basınç dayanımı tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [56] TS EN 772-10, Kireç Kumtaşı ve Gazbeton Birimlerde Rutubet Muhtevası Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [57] Budwell International Ltd, “What is Autoclaved Concrete”, Amsterdam, 2004.
- [58] E. K. Kunhanandan Nambiar, K. Ramamurthy, Air-Void Characterization Of Foam Concrete, Cement and Concrete Research 37, 221–230, 2007.

[59] imentaş A.ř., imentaş - Gazbeton Tasarım ve Uygulama El Kitabı, imentaş Gazbeton İşletmeleri, İzmır, 1998.