

**UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİYLE  
HAFİF-İRİ AGREGA ÜRETİMİ VE ATMOSFERİK ETKİLER  
ALTINDA PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

**THE PRODUCTION OF LIGHT-COARSE AGGREGATES  
FROM FLY ASH WITH COLD BINDING METHOD AND ITS  
EVALUTION OF UNDER THE ATMOSPHERIC EFFECTS**

**KENAN ZORLU**

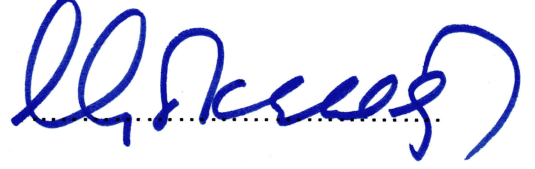
**DOÇ. DR. ADİL BİNAL**  
**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

**KENAN ZORLU'nun hazırladığı "Uçucu Küllerden Soğuk Bağlama Yöntemiyle Hafif-İri Agrega Üretimi ve Atmosferik Etkiler Altında Performansının Araştırılması" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.**

Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU  
Başkan




Doç. Dr. Adil BİNAL  
Danışman



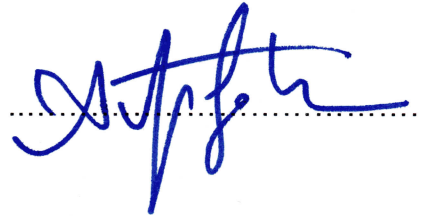
Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU  
Üye



Doç. Dr. Berna UNUTMAZ  
Üye



Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman Ufuk ŞAHİN  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun 03.07.2017 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

03 / 07 / 2017

Kenan ZORLU

Kenan ZORLU

*Sevgili dedem,*

*Fikri Kenan ZORLU*

*(24.03.1935 - ∞)*

## ETİK

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

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

beyan ederim.

16/06/2017



KENAN ZORLU

## ÖZET

# UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİYLE HAFİF-İRİ AGREGA ÜRETİMİ VE ATMOSFERİK ETKİLER ALTINDA PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

**Kenan ZORLU**

**Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Adil BİNAL**

**Haziran 2017, 127 sayfa**

Günümüzde depolama sorunları nedeniyle endüstriyel atık maddelerin geri dönüşümünün sağlanması konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda düşük yoğunluğa sahip doğal veya yapay hafif agregalarla üretilen betonların yapı sektöründe kullanımı hızla artmaktadır. Doğal kaynakların kısıtlı olmasından ötürü hafif agregaya katkılı beton kullanımına artan arz ve talep, araştırmacıları çevresel etmenlere ve enerji kullanımını da göz önüne alınarak yapay hafif agregaya üretimine sevk etmiştir. Buna bağlı olarak uçucu kül gibi endüstriyel atık maddeler yapay hafif agregaya üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında Yatağan termik santralinden alınmış uçucu kül ile hafif-iri agregaya üretimi yapılmıştır. Agregaya üretimi için 18 mm çapında soğuk presleme yöntemiyle küp ve küre geometrisi arasında bir şekile sahip agregaya üretimi sağlayan kalıp tasarlanmıştır. Bu sayede kaya birimlerinin müsait olmadığı çeşitli alanlarda (inşaat vb.) yeni bir agregaya kaynağı alternatifini sunulması

planlanmıştır. Geliştirilen kalıpla hiçbir bağlayıcı ve kimyasal malzeme kullanılmadan ve ısı işlem (sinterleme) uygulanmadan presleme yöntemi kullanılarak uçucu kül agrega üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş agregalar başta uçucu kül olmak üzere; Portland çimentosu ve sudan oluşan homojen karışımla üretilmiştir. Üretilen agregaların beton içerisinde kullanılabilirliği ve çeşitli yaşlandırma deneyleriyle (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam) dayanımı araştırılmıştır. Bu tez kapsamında mevcut yöntemlerde olduğu gibi agrega üretimi gerçekleştirilmiş ve üretilen agregaların dayanımı betonlarda kullanılan kireçtaşı agregasının dayanımına yaklaşmakta ve az da olsa yüksek olduğu saptanmıştır. Soğuk bağlama yöntemiyle üretilen uçucu kül agregalarının nokta yükü dayanımı yaklaşık olarak 5,9 MPa olarak belirlenirken, kireçtaşı agregasının yaklaşık 5,7 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca uçucu külden üretilen agregaların yoğunlukları yaklaşık 1,83 g/cm<sup>3</sup>, kireçtaşı agregalarının yoğunlukları 2,69 g/cm<sup>3</sup> olarak saptanmıştır. Uçucu külden üretilen agregalar ile kireçtaşı agregasından üretilen taze beton numuneler üzerinde yapılan dayanım değerleri kıyaslandığında uçucu kül agregalı beton numuneler ortalama 53,62 MPa dayanım değerine sahipken, kireçtaşı agregalı beton numuneler için bu değer 44,22 MPa olduğu belirlenmiştir. Ayrıca uçucu kül agregalı beton numunelerin yoğunluk (kuru yoğunluk, doymuş yoğunluk), ağırlıkça su emme, gözeneklilik değerleri de kireçtaşı agregalı beton numunelere göre oldukça azdır. 22 çevrim ve 44 çevrim olarak gerçekleştirilen donma-çözülme yaşlandırma deneyi sonunda belirlenen dayanım değerinde 44 çevrim sonunda %1,73 oranında bir değişim saptanmıştır. 40 çevrim ve 80 çevrim olarak gerçekleştirilen ıslanma-kuruma deneyinde ise 80 çevrim sonunda dayanım değerinde %4 civarında değişim meydana gelmiştir. Dış ortamda yapılan 270 çevrim yaşlandırma deneyi sonunda, kireçtaşı agregasıyla üretilen beton numuneler ile uçucu kül agregasıyla üretilen beton numunelerin dayanım değerleri ile fiziksel özellik değerlerinde fazla bir farklılık belirlenmemiştir.

**Anahtar kelimeler:** Uçucu Kül, Hafif Agrega, Yatağan Termik Santrali, Soğuk Bağlama, Yaşlandırma Deneyleri

## **ABSTRACT**

# **THE PRODUCTION OF LIGHT-COARSE AGGREGATES FROM FLY ASH WITH COLD BINDING METHOD AND ITS EVALUTION OF UNDER THE ATMOSPHERIC EFFECTS**

**Kenan ZORLU**

**Master of Science, Geological Engineering Department**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adil BİNAL**

**June 2017, 127 pages**

Recently, several important studies focus on the recycling of industrial waste materials due to their storage problem. During last decade, usage of concrete that produced from low density natural or lightweight artificial aggregates have increased in construction sector. Considering the increases on supply and demand on lightweight aggregate included concretes along with limited resource of natural raw materials, researchers focused on producing artificial lightweight aggregate with low energy usages and environmentally friendly. Therefore, industrial wastes, such fly ashes, are being used on artificial lightweight aggregate production.

In this study fly ashes, were obtained from Yatağan Thermal Power Plant, used in light-coarse aggregate production. For this aim, a mould was design that allow to produce aggregates with 18 mm diameter geometry between cube to sphere using cold binding method. Herewith, a new alternative resource for aggregate could use for the areas (e.g. construction sites) with unsuitable raw materials. Another



advantage of the designed mould is to produce fly ash aggregate applying pressing method using without any binding agent or sintering. The aggregate production in this study based on homogenous mixture of mainly fly ash, Portland cement and water. The strength and availability of produced aggregates in concretes were tested several aging tests (freezing-thawing, wetting-drying, exposure external environment). Furthermore, aggregates were also produced traditional methods and the results show that fly ash aggregates have similar or quite high strength than limestone aggregates that used in conventional concretes. The fly ash aggregates that are produced by cold binding methods have approximately 5,9 MPa point load index, whereas limestone aggregates have 5,7 MPa point load index. Additionally, density of fly ash aggregates are approximately 1,83 g/cm<sup>3</sup> and limestone aggregates are 2,69 g/cm<sup>3</sup>. The strength of fly ash included aggregate concretes (53,62 MPa) are higher than limestone aggregate ones (44,22 MPa). The density (dry and saturated), water absorption capacity and porosity of the fly ash aggregates are less than limestone aggregates. The freezing-thawing aging test, both 22 and 44 cycles, results show that the strength of concrete samples increased 1.73%. The wetting-drying test applied as 40 and 80 cycles and the strength of concrete decreased 4% after 80 cycles test. The physical characteristics and strength of both fly ash and limestone aggregates are more and less similar after 270 cycles exposure external environment test.

**Keywords:** Fly Ash, Lightweight Aggregate, Yatağan Thermal Power Plant, Cold Binding, Aging Tests

## TEŞEKKÜR

Sıradan bir öğrenciden ziyade öğrencisiyle adeta arkadaş yakınlığında olup, çalışmamın her aşamasında en ayrıntılı şekilde ilgilenen, eleştirileri ve önerileriyle çalışmamda adeta ilham kaynağı olan, her konuda bana yardım edip desteğini hiç bir zaman esirgemeyen, yıllar boyunca kazanmış olduğu bilgi birikimini ve tecrübelerini en iyi şekilde yansıtan ve aktaran, değerli danışmanım Doç. Dr. Adil BİNAL'a,

Beton numunelerime ait çeşitli deneyler ve çalışmalar Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında katkıları, destekleri ve yardımlarından ötürü Jeoloji Yüksek Mühendisi Ümit ÜNAL'a ve Laboratuvar sorumlusu Muhsin YALÇIN'a,

Değerli katkıları, yapıcı eleştirileri ve tecrübeleri ile teze yön veren çok değerli jüri üyelerim; Prof. Dr. Candan GÖKÇEOĞLU'na, Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU'na, Doç. Dr. Berna UNUTMAZ'a, Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman Ufuk ŞAHİN'e,

Laboratuvar çalışmaları sırasında yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, Hacettepe Üniversitesi Zemin Mekaniği Laboratuvarı'nın değerli teknisyeni Özgür EROL'a,

Kireçtaşı örneklerinin kırılmasından elenmesine kadar tüm aşamalarında yardımlarından dolayı, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği teknisyenlerinden Mustafa YILMAZ'a,

SEM çalışmalarım için betonlardan örnek alınmasından görüntülenme kısmına kadar olan tüm aşamalarında her türlü yardımlarından dolayı, Ethem ERSARI'ya ve Mehmet ÖZCAN'a,

Tezimin Genel Jeoloji kısmında fikir, görüş ve beyanlarıyla birlikte bilgisini, tecrübesini en iyi şekilde ve en ince ayrıntısına kadar yansıtan ve aktaran Arş. Gör. Alaettin TUNCER'e,

Tez çalışmalarımın tamamında çeşitli konularda fikir ve görüşlerine danıştığım yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, Arş. Gör. Levent BAYRAM'a, Volkan ERKUT'a, Dihak A. ÖNDER'e, Hasan YARADILMIŞ'a ve Dr. Rıza Görkem OSKAY'a,

Tanıdığım günden beri tam anlamıyla vefa örneği sergileyen, gerek tez çalışmamda gerekse hayatımda aldığım tüm kararlarda hep yanımda olan manevi desteğini her daim hissettiğim sadece arkadaşım değil adeta kardeşim, Yiğit Emre AKTURAN'a,

Çalışmalarımın başından sonuna kadar en az ailem kadar yanımda olan, her türlü iyilik ve fedakârlıklarıyla desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, sevgili eniştem Zafer YAZAROĞLU'na, halam Nur YAZAROĞLU'na ve kuzenim Baran YAZAROĞLU'na,

Çalışmalarım sırasında büyük bir özveri ve itina ile beni destekleyen, her türlü maddi ve manevi fedakârlıktan kaçınmayan, sahip olduğum en büyük manevi değerlerim; annem Gül ZORLU'ya, babam Levent ZORLU'ya, canım kardeşim Nihal Simay ZORLU'ya, babaannem Nihal ZORLU'ya ve ahirete intikâl eden sevgili dedem Fikri Kenan ZORLU'ya,

Sonsuz teşekkür ederim.

Kenan ZORLU

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELER .....	x
ŞEKİLLER .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xvi
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	3
3. GENEL BİLGİLER .....	15
3.1. Uçucu Kül Tanımı ve Özellikleri .....	15
3.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....	16
3.1.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri .....	18
3.1.3. Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri .....	19
3.1.4. Uçucu Külün Kullanım Alanları .....	21
3.1.5. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri .....	22
3.2. Kireçtaşı .....	23
3.2.1. Kireçtaşının Fiziksel Özellikleri .....	23
3.2.2. Kireçtaşının Kimyasal Özellikleri .....	25
3.2.3. Kireçtaşının Kullanım Alanları .....	25
3.3. Portland Çimentosu .....	26
3.3.1. Portland Çimentosu Üretimi .....	27
3.3.2. Portland Çimentosunun Bileşimi, Kompozisyonu ve Kimyasal Özellikleri .....	28
3.3.3. Portland Çimento Hidratasyonu .....	29
3.3.4. Portland Çimentosu Tipleri ve Bileşimleri .....	30
3.3.5. Portland Çimentosunun Dayanım Sınıflaması ve Priz Süreleri .....	33
3.3.6. Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri .....	35
3.4. Agregalar .....	36
3.4.1. Agregaların Sınıflandırılması .....	36
3.4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri .....	40
3.4.2.1. Agreganın Porozitesi .....	40

3.4.2.2. Agregada – Su Bağıntısı .....	40
3.4.2.3. Özgül Ağırlık .....	41
3.4.2.4. Kompasite .....	42
3.4.2.5. Birim Ağırlıkları .....	42
3.4.2.6. Dona Dayanıklılık .....	43
3.4.3. Agregada Granülometrisi (Tane Büyüklüğü Dağılımı) .....	43
3.4.4. Agregaların Mekanik Özellikleri .....	44
3.4.5. Agregada Bulunabilecek Zararlı Maddeler .....	45
4. ARAZİ ÇALIŞMALARI .....	47
4.1. Çalışma Alanı .....	47
4.2. Kireçtaşı Ocağının Yeri.....	47
4.3. Açık Ocak İşletmesi Çevresinin Genel Jeolojisi .....	48
5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI .....	50
5.1. Kullanılan Malzemeler .....	50
5.1.1. Çimento .....	50
5.1.2. Su .....	52
5.1.3. Uçucu Kül .....	52
5.1.4. Kireçtaşı .....	55
5.2. Uçucu Külden Agregada Üretim Kalıbı Tasarımı .....	59
5.3. Uçucu Külden Agregada Üretimi .....	64
5.3.1. Uçucu Kül Agregalarının Kür İşlemleri.....	68
5.3.2. Uçucu Kül Agregasının Fiziko-Mekanik Özellikleri .....	69
5.3.3. Uçucu Kül Agregasının Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi.....	70
5.3.4. Kireçtaşı Agregasının Fiziko-Mekanik Özellikleri .....	71
5.3.5. Kireçtaşı Agregasının Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi .....	72
6. BETON ÜRETİMİ, NUMUNELERİN YERİNE KONMASI VE BAKIMI.....	74
6.1. Beton Numunesi Hazırlama.....	76
6.1.1. Taze Beton .....	76
6.2. Yaşlandırma Deneyleri .....	77
6.2.1. Donma-Çözülme Deneyi .....	77
6.2.2. Islanma-Kuruma Deneyi .....	78
6.2.3. Dış Ortam Deneyi .....	80
6.3. Betonların Fiziko-Mekanik Özellikleri.....	83
6.3.1. Betonlarda Yoğunluk Değerlerinin Hesaplanması .....	83

6.3.2.	Betonların Gözeneklilik Değerlerinin Hesaplanması.....	85
6.3.3.	Betonların Ağırlıkça Su Emme Değerlerinin Hesaplanması .....	85
6.4.	Sertleşmiş Beton Deneyleri .....	88
6.4.1.	Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyi .....	88
6.4.2.	Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı.....	91
7.	BETON NUMUNELERDEKİ SEM ÇALIŞMALARI.....	95
7.1.	Kenar Kısım (Uçucu Kül Agregası – Çimento Pastası).....	96
7.2.	Kenar Kısım (Kireçtaşı Agregası – Çimento Pastası).....	98
7.3.	Orta Kısım (Uçucu Kül Agregası – Çimento Pastası) .....	100
7.4.	Orta Kısım (Kireçtaşı Agregası – Çimento Pastası).....	102
8.	DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA .....	104
9.	ÖNERİLER.....	118
	KAYNAKLAR.....	119
	ÖZGEÇMİŞ .....	127
	EKLER	

# ÇİZELGELER

## Sayfa

Çizelge 3.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin majör oksit değerleri [45] .....	20
Çizelge 3.2. Uçucu küllerin farklı kullanım alanları [46,64,65] .....	21
Çizelge 3.3. Sıradan Portland çimentosunun tipik kimyasal kompozisyonu [86] ..	28
Çizelge 3.4. Çimento ana bileşiklerinin hidratasyon karakteristikleri [86] .....	29
Çizelge 3.5. TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak üretilen Portland çimentolarının tipleri, ana çeşitleri ve içerikleri [88] .....	32
Çizelge 3.6. TS EN 197-1 standartına göre Portland çimentolarının mekanik dayanımları ve fiziksel özellikleri [88] .....	34
Çizelge 3.7. Portland çimentosunun kimyasal özellikleri için karakteristik değerler [87] .....	35
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri .....	50
Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri .....	51
Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun mekanik özellikleri .....	51
Çizelge 5.4. Yatağan uçucu külüne ait kimyasal analiz sonuçları [56].....	53
Çizelge 5.5. Beton numunelerde kullanılan agregaların ASTM standartlarına göre elek numaraları ve boyutlarının sınıflandırılması .....	57
Çizelge 5.6. Uçucu kül agregasının kuru-doygun yoğunluk, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları .....	70
Çizelge 5.7. Uçucu kül agregasının nokta yükü dayanım indeksi deneyine ait sonuçlar.....	71
Çizelge 5.8. Kireçtaşı agregasının kuru-doygun yoğunluk, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları .....	72
Çizelge 5.9. Kireçtaşı agregasının nokta yükü dayanım indeksi deneyine ait sonuçlar.....	73
Çizelge 6.1. Donma-çözülme deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları.....	86
Çizelge 6.2. Islanma-kuruma deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları.....	87

Çizelge 6.3. Dış ortam deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları.....	88
Çizelge 6.4. Donma-çözülme deneyine ait $P_{dalga}$ hızı değerleri .....	90
Çizelge 6.5. Islanma-kuruma deneyine ait $P_{dalga}$ hızı değerleri.....	90
Çizelge 6.6. Dış ortam deneyine ait $P_{dalga}$ hızı değerleri.....	90
Çizelge 6.7. Donma-çözülme deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri .....	93
Çizelge 6.8. Islanma-kuruma deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri .....	93
Çizelge 6.9. Dış ortam deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri .....	93
Çizelge 6.10. TS-EN 206-1 standartına göre silindir ve küp numunelerin, tek eksenli sıkışma dayanımlarına göre sınıflandırılması .....	94
Çizelge 8.1. Uçucu kül agregası kullanılmış beton numunelerin donma-çözülme deneyi çevrimleri sonrası fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler .....	108
Çizelge 8.2. Uçucu kül agregası kullanılmış beton numunelerin ıslanma-kuruma deneyi çevrimleri sonrası fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler .....	110
Çizelge 8.3. Dış ortam deneyinde uçucu kül agregası ve kireçtaşı agregası kullanılmış beton örneklerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimler.....	113



# ŞEKİLLER

## Sayfa

Şekil 2.1. Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] kullanmış oldukları döner elek ve beton mikseri.....	4
Şekil 2.2. (a) Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] üretmiş olduğu küresel şekilli pelet taneleri, (b) Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] üretmiş olduğu sinterlenmiş pelet taneleri.....	4
Şekil 2.3. (a) Gesoğlu vd.'nin [11] yapmış oldukları peletizasyon işleminin sonunda üretmiş oldukları taze peletler, (b) Gesoğlu vd.'nin [11] soğuk bağlama yöntemiyle, yüksek fırın cürufu, iki farklı uçucu kül ve çimento kullanılarak ürettikleri pelet agregalar .....	5
Şekil 2.4. (a) Priyadharshini vd.'nin [13] 2011 yılında geliştirdikleri uçucu kül peletleme cihazı, (b) Priyadharshini vd.'nin [13] üretmiş oldukları uçucu kül pelet taneleri .....	6
Şekil 2.5. (a) Alzate vd.'nin [16] üretmiş oldukları 4 mm çapında sertleşmemiş silindirik peletler.....	8
Şekil 2.5. (b) Alzate vd.'nin [16] 4,2 MPa dayanım altında küredikleri peletlerin görüntüsü .....	8
Şekil 3.1. Portland çimentosunun hidratasyon aşamalarının şematik gösterimi [81] .....	29
Şekil 3.2. Çeşitli agregaların sınıflandırılması [94].....	37
Şekil 3.3. Agregatanelerinin suda görünüş şekilleri; (a) Tamamen kuru, (b) Kuru yüzeyli, (c) Doygun kuru yüzeyli, (d) Tamamen Islak [94] .....	41
Şekil 3.4. Sınırlanmış granülometri eğrileri (A: Kabul edilen alt sınır, C: Kabul edilen üst sınır, B: İdeal karışım granülometrisi) [99].....	44
Şekil 4.1. Beytepe köyünden örnek alımı yapılan taş ocağının yeri.....	47
Şekil 4.2. Beytepe Köyü ve civarının jeoloji haritası (Deli ve Orhan [103]'dan değiştirilerek alınmıştır) .....	49
Şekil 5.1. Yatağan uçucu külüne ait XRD görüntüsü .....	54
Şekil 5.2. Yatağan termik santralinden temin edilen uçucu küle ait tane boyu grafiği .....	55
Şekil 5.3. Beytepe Köyü'nden temin edilen kireçtaşı blokları .....	56
Şekil 5.4. Çeneli kırıcı ile kırılmış farklı tane boyutundaki kireçtaşı agregaları .....	56

Şekil 5.5. Beton karışımında kullanılan iri taneli malzeme tane boyu dağılımı grafiği (Kesikli çizgiler standart alt ve üst sınırlar) .....	58
Şekil 5.6. Beton karışımında kullanılan ince taneli malzeme tane boyu dağılımı grafiği (Kesikli çizgiler standart alt ve üst sınırlar).....	58
Şekil 5.7. Kireçtaşına ait XRD görüntüsü .....	59
Şekil 5.8. Cihazın alt plakasının farklı açılardan görünümü .....	60
Şekil 5.9. Cihazın üst plakasının farklı açılardan görünümü .....	61
Şekil 5.10. Presleme işleminde kullanılan yük bindirme çubuğu (Kalıp için bu çubuktan 15 adet vardır) .....	61
Şekil 5.11. Preslenmiş agregayı kalıptan çıkarmak için kullanılan çelik halka .....	62
Şekil 5.12. Soğuk presleme sonrası cihazdan çıkan agreganın küp ve küre arası görünümü .....	62
Şekil 5.13. Alt plakada bulunan dren delikleri ve vida delikleri (En dışta bulunan 4 adet delik).....	63
Şekil 5.14. Alt plakanın üstten görünüşü .....	63
Şekil 5.15. Uçucu kül karışımının kalıbın agrega haznesine eklenmesi .....	65
Şekil 5.16. Kalıba yük bindirme çubuklarının yerleştirilmesi .....	65
Şekil 5.17. Soğuk presleme işlemi.....	66
Şekil 5.18. Presleme sonrası alt plakanın sökülmesi.....	66
Şekil 5.19. Presleme ile agregaların üst plakadan çıkarılışı .....	67
Şekil 5.20. Kalıptan çıkarılmış uçucu külden üretilen 18 mm çapa sahip agregalar .....	67
Şekil 5.21. Kürlenmiş agrega taneleri .....	68
Şekil 6.1. Karışımın beton kalıba dökülmesi.....	75
Şekil 6.2. Beton numunenin kalıpta görünümü (alt yüzey) .....	75
Şekil 6.3. Kalıptan çıkarılan beton numune .....	76
Şekil 6.4. Donma-çözülme deneyine maruz bırakılmış beton numuneler .....	78
Şekil 6.5. Islanma-kuruma deneyine ait beton numunelerin etüv fırınındaki görüntüsü .....	79
Şekil 6.6. Islanma-kuruma deneyine ait beton numunelerin kür havuzundaki görünümü .....	80
Şekil 6.7. Dış ortam deneyine maruz bırakılmış beton numuneler (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe).....	81

Şekil 6.8. Dış ortam deneyine maruz bırakılmış beton numunelerin genel görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe) .....	82
Şekil 6.9. Dış ortam deneyindeki numunelerin kar altındaki görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe).....	82
Şekil 6.10. Dış ortamdaki beton numunelerin yakın plan görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe).....	83
Şekil 6.11. Pundit Test marka ultrasonik test aletine ait görüntü .....	89
Şekil 6.12. 3000 kN dayanımlı hidrolik presleme cihazı .....	92
Şekil 7.1. Beton numunesinin yüzeyinden SEM görüntüleme örneklerinin alındığı bölgeler .....	96
Şekil 7.2. Kenar kısım (Uçucu kül agregası, UÇKA - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş.....	97
Şekil 7.3. Kenar kısım (Kireçtaşı agregası, KÇT - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş.....	99
Şekil 7.4. Orta kısım (Uçucu kül agregası, UÇKA - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş.....	101
Şekil 7.5. Orta kısım (Kireçtaşı agregası, KÇT - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş.....	103
Şekil 8.1. Donma-çözülme deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği.....	107
Şekil 8.2. Islanma-kuruma deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği.....	109
Şekil 8.3. Dış ortam deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	112
Şekil 8.4. (a) Gözeneklilik, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	115
Şekil 8.4. (b) Doygun yoğunluk, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	115
Şekil 8.4. (c) Kuru yoğunluk, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	116
Şekil 8.4. (d) Ağırlıkça su emme, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	116

Şekil 8.4. (e) $P_{dalga}$ hızı, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri).....	117
Şekil 8.4. (f) UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri) .....	117

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

$\bar{X}$	Ortalama
$\bar{X}_\Delta$	Ortalama değişim değeri
$^\circ\text{C}$	Derece (Celcius)
As	Ağırlıkça su emme
cm	Santimetre
D	Çap
$D_e$	Eşdeğer karot çapı
g	Gram
$I_s$	Nokta yükü dayanım indeksi
kg	Kilogram
km	Kilometre
kN	Kilonewton
$M_d$	Kuru ağırlık
mm	Milimetre
MPa	Megapascal ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )
$M_w$	Islak ağırlık
n	Gözeneklilik
N	Örnek sayısı
V	Hacim
$\mu\text{m}$	Mikrometre ( $10^{-6}$ metre)

$\rho_{dry}$	Kuru yoğunluk
$\rho_{sat}$	Doygun yoğunluk
$\sigma$	Standart sapma
$\Delta$	Değişim değeri

### **Kısaltmalar**

ASTM	American Society Testing for Materials
DSİ	Devlet Su İşleri
EN	Avrupa Standartları
ISRM	Uluslararası Kaya Mekaniği Birliği
KAB	Kireçtaşı agregalı beton numuneleri
KÇT	Kireçtaşı agregası
SE	İkincil elektron
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
TS	Türk Standartları
UCS	Tek eksenli sıkışma dayanımı
UÇKA	Uçucu kül agregası
UÇKAB	Uçucu kül agregalı beton numuneleri
XRD	X-ışını difraktogramı

# 1. GİRİŞ

İçerisinde bulunduğumuz yüzyılda gelişimi daha da hızlanan teknolojik ilerleme ve nüfus artışı ülkelerin enerji ihtiyacını oldukça artırmaktadır. Bu artışın önümüzdeki dönemlerde de hızlanarak devam edeceği açıktır. Bugün dünyanın enerji ihtiyacının karşılanmasında çeşitli endüstriyel maddeler ve fosil yakıtlar önemli bir yer tutmaktadır.

Gelişen teknoloji ve artan nüfusla, zaman içerisinde enerjiye olan gereksinim de artacaktır. Bu durum, termik santrallerin üretim kapasitelerinin artmasına, beraberinde yakılan kömür atıklarının da çevre sorunlarına yol açmasına neden olacaktır.

Amerika'da başlayan ve kısa sürede tüm dünyaya yayılan uçucu kül kullanımı başta inşaat sektörü olmak üzere; kimya sektöründe, tarım alanlarında, seramik, cam, döküm-metal sanayi, sondaj çalışmalarında ve farklı sektörlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu sektörler içinde en çok kullanılan ve teknik anlamda faydalanılan inşaat sektördür [1].

Türkiye'de kömürle elektrik enerjisi üreten faal halde 16 adet termik santral vardır. Bunlara ilave olarak 30 adet daha termik santral kurulumu planlanmaktadır [2]. Ülkemizdeki mevcut termik santrallerimizde düşük kalorili linyit kömürü yakılmakta olup, yaklaşık olarak yılda 24,2 milyon ton uçucu kül atığı elde edilmiştir [3].

Dünya genelinde bir yılda gerçekleştirilen üretim sonucunda toplam uçucu külün ancak %25'ten azı değerlendirilebilmektedir. Hollanda, Danimarka, İtalya gibi çeşitli ülkelerde uçucu külün neredeyse tamamı kullanılırken, Fransa, Avusturalya, Almanya gibi ülkelerde %80'in üzerinde kullanılmaktadır [4]. İngiltere'de ise yaklaşık %50'si kullanılmaktadır [5]. Bu ülkeler uçucu külleri genel olarak çimento, beton, harç, tarım alanları, gübre imalatı vb. alanlarda kullanılmaktadırlar [4]. Ülkemizde ise güncel verilere göre uçucu külün ortalama %2'sinin değerlendirildiği yönündedir [2]. Ülkemizin sahip olacağı termik santral sayısının artması ve buna bağlı olarak atık olarak çıkan uçucu kül miktarının da 4-5 kat artması beklenmektedir. 2020 yılına kadar termik santrallerde atık külün yıllık 50 milyon ton

gibi ciddi rakamlara çıkması beklenmektedir [6]. Ülkemizde uçucu külün değerlendirilme oranının son derece düşük olması ve bu nedenle uçucu külün doğaya verdiği zararların azaltılması ve atık madde niteliğinden kurtulmadığı takdirde potansiyel bir sorun olmaya devam etmemesi için uçucu külün farklı konularda daha yüksek oranlarda kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle uçucu külün, beton ve ince agrega katkısı olarak kullanılması yanında da iri tane boyutunda hafif agrega üretiminin de yapılabilmesi yeni bir uygulama alanı oluşturacaktır. Bunun sonucu olarak hem uçucu küllerin doğaya verdiği zararların engellenmesi hem de ülke ekonomisine pozitif fayda sağlaması planlanmaktadır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Verma vd., [7] 1998 yılında yapmış oldukları çalışmada betonlarda içi boş veya dolu blok üretimi için geleneksel agreganın yerine, sinterlenmiş haldeki hafif uçucu kül agregasının kullanılmasının yüksek katlı yapılarda ölü yükü azaltacağını belirtmişlerdir.

Chang ve Shieh'in [8] 1996 yılında ve Gesoğlu vd., [9] 2004 yılında yapmış oldukları çalışmalarda, yüksek sıcaklıkta sinterleme yöntemi kullanarak üretmiş oldukları yapay uçucu kül hafif-iri agregaları, hafif beton üretiminde kullanılmışlar ve betondaki etkisini araştırılmışlar. Araştırmacılar bununla birlikte yüksek oranda uçucu kül ile bir miktar Portland çimentosunu karıştırarak ürettikleri hafif-iri agregaların, hafif beton üretiminde kullanarak taşıyıcı bloklar üretmişlerdir.

Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] 2006 yılında bir beton mikserini pelet diskleri üretmek için modifiye etmişlerdir. Mikserin içinde yer alan delikli (5,7 cm) döner bir elek vasıtasıyla (Şekil 2.1) uçucu külden küresel şekilli pelet taneleri üretmişlerdir (Şekil 2.2a). Pelet taneleri üretimi için %15-35 arasında neme sahip uçucu küller kullanılmışlardır. Pelet üretiminden sonra pelet taneleri 1100°C 1 saat süresince sinterlemişlerdir (Şekil 2.2b).

Üretilen pelet tanelerinin boyutları 5-16 mm arasında değişmektedir ve ağırlıkça su emme kapasiteleri %19-30 arasında değişmektedir. Dayanım değerlerinin belirlenmesi için agrega kırılma değeri deneyleri yapmışlar (Aggregate Crushing Value Test) ve bu değerlerin 0,8-2,2 ton arasında değiştiğini saptamışlardır. Bu değerlerin normal bir beton üretimi için belirtilen 5 ton değerinden çok daha düşük çıktığını belirlemişlerdir.



Şekil 2.1. Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] kullanmış oldukları döner elek ve beton mikseri



(a)

(b)

Şekil 2.2. (a) Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] üretmiş olduğu küresel şekilli pelet taneleri, (b) Harikrishnan ve Ramamurthy'nin [10] üretmiş olduğu sinterlenmiş pelet taneleri

Gesoğlu vd., [11] 2012 yılında yaptıkları çalışmada soğuk bağlama yöntemiyle, yüksek fırın cürufu, iki farklı uçucu kül ve çimento kullanılarak peletleştirilmiş agregalar elde etmişler (Şekil 2.3a-b). Çimento içerisinde %5-%20 arasında değişen oranlarda bağlayıcı malzeme olarak kullanmışlar. Oda sıcaklığında 20 çeşit agrega üretildikten sonra, su emme ve özgül ağırlık gibi fiziko-mekanik özelliklerini belirlemişler ve sonrasında bu agregaları kullanarak çimento içerikli hafif betonlar üretilmişler. Agregası tipinin beton üzerinde etkisini gözlemlemek

amacıyla 28 ve 56. günlerde beton numunelere basınç testi uygulamışlar. Agregada üretiminde bağlayıcı malzeme çimento kullanması agregada özgül ağırlığını arttırmış ve agregada su emme oranını azalttığını gözlemlemişler. F sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılık özelliğinin az olmasından dolayı agregada üretiminde kullanılmasını uygun bulmamışlardır. Hafif betonların dayanımının agregada dayanımı üzerinde doğrudan etkisinin olduğunu belirlemişlerdir. Yapmış oldukları çalışma sonucunda peletleştirilmiş agregalarda çimento oranının fazla olması durumunda, peletleştirilmiş agregalarla üretilen betonlarda dayanım artışı olduğunu tespit etmişlerdir.



(a)



(b)

Şekil 2.3. (a) Gesoğlu vd.'nin [11] yapmış oldukları peletizasyon işleminin sonunda üretmiş oldukları taze peletler, (b) Gesoğlu vd.'nin [11] soğuk bağlama yöntemiyle, yüksek fırın cürufu, iki farklı uçucu kül ve çimento kullanılarak ürettikleri pelet agregalar

Manikandan ve Ramamurthy'nin [12] 2007 yılında yapmış oldukları çalışmada santrifüj tekniği kullanarak peletleme üzerine uçucu kül tane boyutunun etkisini incelemek için iki farklı termik santralden aldıkları uçucu küller üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Araştırmaları sonucu, %30 oranında kaolinit katarak hazırladıkları uçucu kül agregalarının peletleme veriminin, ince kül kullanıldıkça arttığını belirlemişlerdir.

Priyadharshini vd., [13] 2011 yılında yapmış oldukları çalışmada bir cihaz geliştirerek soğuk bağlama yöntemiyle yapılmış uçucu kül agregalarıyla doğal agregaları karşılaştırmış ve soğuk bağlı uçucu kül agregalarının betonda agrega olarak kullanılabilirliğini öngörmüşler. Santrifüj tekniği kullanılarak uçucu küle %8 oranında Portland çimentosu eklemişler ve farklı boylarda uçucu kül agregası üretmişlerdir. Normal agregalarla soğuk bağlı yöntemiyle yapılmış agregalarla yapılan betonların dayanım ve yoğunluk özellikleri karşılaştırmışlar. Uçucu kül agregaları kullanıldığında dayanım düşmüş, ancak yine de yapısal materyal olarak yeterli dayanımı sağlamıştır. Uçucu kül agregaları doğal agrega katılmış betonlara göre %48 daha düşük dayanım elde etmişlerdir. Peletleştirilmiş uçucu kül agregaları küresel şekilleri nedeniyle normal agregaya göre daha kolay işlenebilirlik sağlamıştır (Şekil 2.4a-b).



(a)

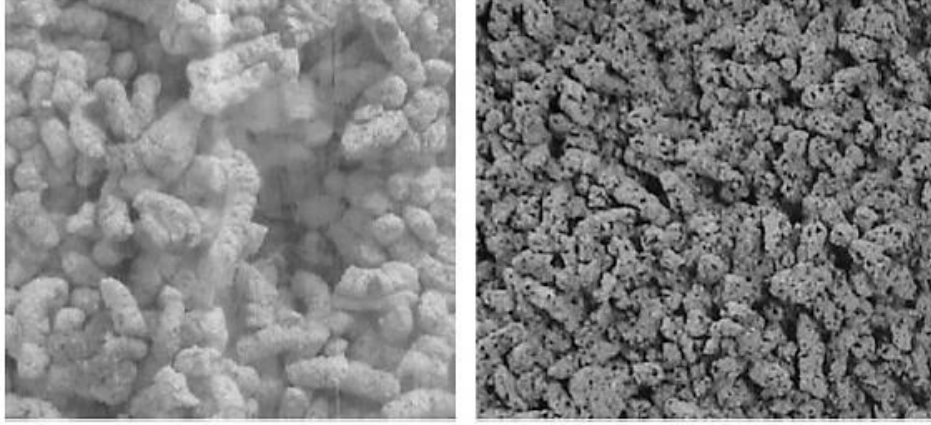
(b)

Şekil 2.4. (a) Priyadharshini vd.'nin [13] 2011 yılında geliştirdikleri uçucu kül peletleme cihazı, (b) Priyadharshini vd.'nin [13] üretmiş oldukları uçucu kül pelet taneleri

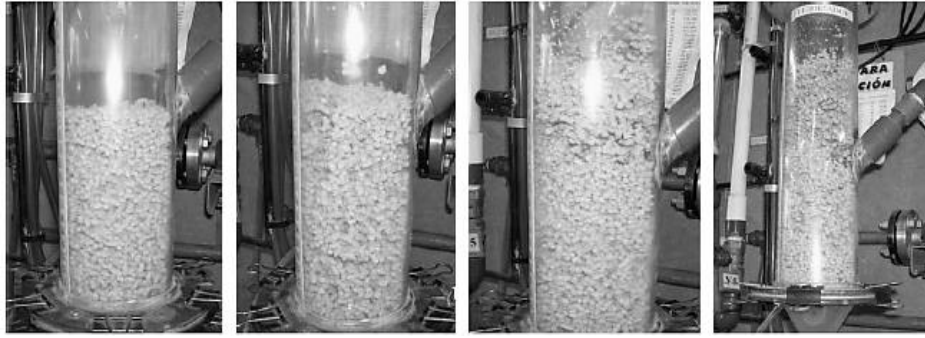
Priyadharshini vd., [14] 2012 yılında yapmış oldukları başka bir çalışmada ise bağlayıcı olarak yine Portland Çimentosu kullanarak uçucu külden beton agregası üretmişlerdir. Bu çalışmada, uçucu külden üretilen agregaları farklı oranlarda betona katarak dayanımlarında meydana değişimleri incelemişlerdir. Tamamen uçucu kül agregası kullanılmış betonların erken dayanım değerlerinin daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Gesoğlu vd., [15] 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada sinterlenmiş ve soğuk bağlanmış hafif agregaların beton duraylılığı üzerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucu peletlenen ve daha sonra sinterlenmiş uçucu kül agregalarının dayanımlarının sadece soğuk bağlama yöntemiyle üretilmiş uçucu kül agregalarından daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Fakat yine aynı çalışmada klorit penetrasyon deneyleri sonucu soğuk bağlama yöntemiyle üretilmiş uçucu kül agregası katılmış betonların daha iyi bir performans gösterdiği belirlemişlerdir.

Alzate vd., [16] 2009 yılında yaptıkları çalışmada tahta talaşına %5-30 arasında taneli kömür ekleyerek ve bağlayıcı malzeme olarak sodyum karboksümetil selüloz kullanarak karışımlar hazırlamışlardır. Bu karışımları çelik elekten geçirerek 8 mm uzunluğunda 4 mm çapında sertleşmemiş silindirik peletler elde etmişlerdir (Şekil 2.5a). Daha sonra peletleri 2 saat süresince 750°C bekletmişlerdir. Bu peletleri içinde karbon monoksit gazı bulunan tüplere yerleştirmişler ve 4,2 MPa gaz basıncı altında kürlemişler (Şekil 2.5b). İşlem sonucu 7 ile 9.5 MJ/Nm<sup>3</sup> yanma değerine sahip peletlenmiş taneler elde etmişlerdir. Peletlerin taşınması ve depolanmasında önem arz eden dayanım ile ilgili olarak bu çalışmada herhangi bir araştırma yapılmamıştır.



Şekil 2.5. (a) Alzate vd.'nin [16] üretmiş oldukları 4 mm çapında sertleşmemiş silindirik peletler



Şekil 2.5. (b) Alzate vd.'nin [16] 4,2 MPa dayanım altında küredikleri peletlerin görüntüsü

Sivakumar ve Gomathi [17] tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada peletleştirilmiş uçucu kül agregalı hafif betonlar üzerinde çalışma yapmışlar ve uçucu kül agregalarının üretim yöntemlerini, değişik karışım oranlarını, puzolanik aktivitelerini, bu agregalarla yapılan betonların mikro yapılarını incelemişler. Uçucu kül agregalarının puzolanik aktivitesi agrega ile çimento pastası arasındaki bağ kuvvetini arttırdığını gözlemlemişlerdir. Uçucu kül agregasına bentonit katmışlar ve agrega dayanımına pozitif fayda sağladığını %20 bentonit kullanılmasının en uygun dayanım verildiği görülmüştür. Çimento kullanımının minimum dayanımı sağlamak için olduğunu değerlendirmişler. Ayrıca uçucu külün artık madde olmadığını ve uçucu kül agregasının betonda katkı maddesi olarak kullanılabileceğini veya ince agrega olarak kül kullanılmasının uygun olabileceğini ön görmüşlerdir.

Kayalı [18], 2007 yılında yapmış olduğu çalışmada sinterlenmiş uçucu kül ve ürünü uygun boyutlarda ezerek hafif agregada elde etmiştir. Bu agregalar benzersiz özelliklerinden dolayı yüksek dayanım ve performanslı beton için uygun olarak değerlendirildiği ayrıca bu agregaların kullanılması normal ağırlıktaki agregada beton dan; %20 daha dayanımlı ve %22 daha hafif olmasını sağladığını belirtmiştir. Deneyler iki seri şeklinde uçucu kül agregalarında gerçekleştirmiştir. İlk seri F sınıfı uçucu küllerin ASTM standardına uygun kullanılmasıyla yapılmıştır. Sonuçlar külün elenip sınıflandırılmasından sonra elde edilmiştir. İkinci seri ise eleme olmaksızın direk haznedan toplanmıştır.

Gesoğlu vd., [19] 2005'de gerçekleştirdikleri çalışmada fiziksel ve kimyasal özelliklerde farklı iki uçucu külün soğuk bağlanma yöntemiyle peletleme diski kullanılarak (pelletizer disc) hafif agregada elde etmişlerdir. Üretilen bu agregalar EPX spektrumu, SEM mikrografi, XRD modeliyle mikro yapıları ve mineralojik özelliklerini incelenmiştir. Sonuçlar yüksek yüzey ve düşük CaO içeriğine sahip uçucu külün hafif agregalara göre daha yüksek dayanımlı olduğunu göstermiştir.

Ramamurthy ve Harikrishnan'ın [20] 2005'de yaptıkları çalışmada sinterlenmiş uçucu kül agregada çimento, kireç ve bentonit bağlayıcılarının performanslarını incelemiştir. Buldukları sonuçlarda göze çarpanlardan biri; sinterlenmiş uçucu kül agregada yapılan çalışmada agreganın özelliğinin bağlayıcı tipine ve dozajına bağlı olduğudur. Bir diğeri; su emilimindeki azalma ve dayanımdaki artışın uçucu külle birlikte bentonit eklendiğinde gerçekleşmesidir. Bağlayıcıların kimyasal bileşimi değiştirmedikleri ve mikro yapıyı etkileyerek agreganın özelliklerini zenginleştirdiklerini tespit etmişler.

Manikandan ve Ramamurthy'nin [21] 2008'de yayımlanan çalışmalarında tipik C sınıfı uçucu kül agreganın özelliklerinde buhar kürü, otoklav ve su kürü etkilerini incelemiştir. Porozite ve su emilimi SEM ve XRD ile ilişkilendirilerek çeşitli faktörlerin ve malzeme karakterinin etkisini araştırmışlar. Normal su kürünün süresinin arttırılması agregada özelliklerinde önemli gelişmeler göstermiştir. Otoklav ve buhar kürü, normal su kürü agregasına göre etkisi daha az görülmüştür ayrıca otoklav agreganın, normal su kürü agregasına yoğun mikro yapısına daha yakın olduğu görülmüştür.

Joseph ve Ramamurthy'nin [22] 2009'da yaptıkları çalışmada değişik karışım oranlarında soğuk bağlı uçucu kül agrega betonların basınç dayanımı ve çalışılabilirliği için ampirik modellerin gelişimini Tepki Yüzeyi Metodolojisi'ne dayanan, istatistiksel tasarlanan deneylerle soğuk bağlı agreganın hacim fraksiyonu, su içeriği, çimento içeriği gibi değerlere göre tartışmışlardır. Geliştirildikleri modeller, soğuk bağlı uçucu kül agregalı beton için yeni bir karışım yöntemi metodunu oluşturmak için yararlı bulmuşlar. Bu metot sayesinde çimento bileşimindeki artışın agreganın kırılmasına ve beton dayanımının azalmasına ve soğuk bağlı agrega da ise hacim oranının artmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Papadakis [23], 2000 yılında yapmış olduğu çalışmada yüksek kalsiyumlu uçucu külün çimento ve agregayla yer değiştirmesinin betona olan etkilerini incelemiştir. Dayanım, porozite, kalsiyum hidroksit içeriklerinin analizini yapmış ve yüksek kalsiyumlu uçucu kül, agregayla yer değiştirdiğinde hidrasyonun başlangıcından itibaren oldukça fazla yüksek dayanım, daha düşük porozite sahip olduğunu gözlemlemiştir. Çimentoyla yer değişimi yapıldığında ise dayanım sabit kaldığını gözlemiştir. Agregalar uçucu küle yer değiştirmesi durumunda ise, (bir noktaya kadar ağırlıkça çimentonun yaklaşık yarısı) daha yüksek dayanım olduğunu tespit etmiştir.

Wedding vd., [24] 1986 yılında yapmış olduğu çalışmada uçucu külün çimento yerine kullanılması üzerine çalışmış ve %10 ila %40 oranında çimento ile uçucu kül değişiminin güç gelişim yüzdesi, nihai dayanım, uzun süreli emici karakteristikler ve sülfat/klorür atakları üzerinde %20 oranında çimento ile uçucu kül değişiminin en iyi sonucu verdiğini ortaya çıkarmışlardır. %40'a kadar artış gösteren uçucu kül eklemelerinin etkileri plastik uçucu kül - çimento karışımlarında aşamalı olarak gelişen işlenebilirliğini göstermiştir.

Hooton vd., [25] 1994 yılında yapmış oldukları çalışmada Portland çimentosu yerine %20 ve %50 oranında C sınıfı uçucu kül ve %40 oranında F sınıfı uçucu külden oluşan karışımlar hazırlamışlar. Test sonuçları (taze beton özellikleri, basınç dayanımı, bükülme mukavemeti, gerilim dayanımı, donma ve çözülme dayanımları) yüksek kaliteli kaplama malzemesi veya kaldırım yapımında C sınıfı ve F sınıfı uçucu külün kullanılabileceğini göstermişler.



Cao vd., [26] 2008 yılında yaptıkları çalışmada Çin'deki enerji talebindeki hızlı artışın yeni termik santrallerin inşasına ihtiyaç doğurduğunu, bunun atık problemlerinde artışa neden olduğunu ve buna bağlı olarak uçucu kül kullanımı şansını tanımlayan soruşturmanın yolunu açtığını açıklamıştır. Tuğla gibi yapı malzemelerinde uçucu kül kullanımı ve uçucu külden alüminyum geri kazanımı için fiziksel ve kimyasal analizler gerçekleştirmişlerdir.

Foner vd., [27] 1999 yılında yapmış oldukları çalışmada uçucu külün fiziksel, kimyasal, mineralojik ve teknik özelliklerinin mükemmel puzolanik özellikler gösterdiğini ve bu uçucu külün yüksek kalitede hammadde verdiğini ortaya çıkarmışlar. Uçucu kül çimentoya eklendiğinde büyük baraj, liman inşaatlarında mükemmel bir puzolan olarak davrandığını ortaya koymuşlardır. Uçucu kül, çimento, ince taneli agregalar, kaba taneli agregalar yerine kullanılabilir olduğunu ve İsrail'deki hafif gaz betonun bir ham maddesini oluşturduğunu belirlemişlerdir.

Philleo [28], 1988 yılında yapmış olduğu çalışmada beton içindeki taze ve sertleşmiş uçucu külün özelliklerini çalışmış, taze ve sertleşmiş betonun özelliklerinde uçucu külün aktif bir rol oynadığını, uçucu kül betonlarının işlenebilirliğinin çok daha iyi olduğunu, bu betonların suya daha az ihtiyaç duyduğunu ortaya koymuştur.

Güneyisi vd., [29] 2013 yılında yaptıkları çalışmada soğuk bağlanmış ya da sinterlenmiş uçucu kül agregalarıyla hafif betonların özellikleriyle ilişkili olarak dayanım üzerinde bir çalışma yapmışlar. F sınıfı uçucu kül ve Portland çimentosundan soğuk bağlı agrega, sinterlenmiş agregalar ise bentonit ve uçucu kül agrega peletlerinin sinterlenmesiyle üretmişler. İki beton serisi su/ bağlayıcı oranı sırayla 0,35 ve 0,55 olarak tasarlanmıştır. Ayrıca betonların performansını karşılaştırmak amacıyla uçucu kül yerine %10 oranında silis dumanı kullanılmıştır. Sinterlenmiş ve soğuk bağlı agregalardan oluşan beton dayanıklılık özellikleri 28 günlük kür süresince, gaz geçirgenliği, hızlı klorür iyonu geçirgenliği değerlendirilmiştir. Basınç dayanım testi de aynı yaşta dayanım düzeyini gözlem amacıyla test edilmiştir. Sinterlenmiş agrega içeren hafif beton, soğuk bağlı agrega içeren hafif betona göre daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişler. Ayrıca silis dumanının hafif betona dahil edilmesi basınç dayanımında artışa neden

olduğunu, beton geçirgenliği ve aşınma direncinde artış sağlandığını gözlemlemişler.

Bilir vd., [30] 2015 yılında yaptıkları çalışmada termik santrallerin ürettiği milyon tonluk uçucu küllerin fazlasının dünya çapında çevre problemlerine sebep olmasından, bunun da insan sağlığını tehdit ettiğini ayrıca depolamanın çok masraflı ve çok geniş alanlar gerektirdiğinin vurgusunu yapmışlar. Yaptıkları bu çalışmada uçucu küllerin ince agrega olarak kullanımının harç içindeki etkisini araştırmışlar. Uçucu kül ince agrega olarak kullanıldığında, harçlarda önemli oranda değişiklik yapılmasına gerek kalmadan %60-70 oranında uçucu kül kullanımı için yeni bir yaklaşımda bulunmuşlardır.

Terzic vd., [31] 2014 yılında yaptıkları çalışmada uçucu kül agregalarının hafif betonlardaki davranışı üzerindeki etkisi araştırmışlar. Bunun için sodyum silikat ve mekanik olarak aktive olmuş ya da olmamış düşük kalsiyumlu uçucu küllerle dört adet hafif yapay agrega soğuk bağlı ve sinterlenmiş peletleri deney programında uygulamışlardır. Hafif betonun normal ağırlıktaki betona göre basınç dayanımı, eğilme mukavemeti, gözeneklilik, büzülme ve elastik modülüne bakılarak karşılaştırmışlardır. Beton davranışındaki farklılıklar elektro mikroskop görüntülerine göre değerlendirilmiştir. Beton dayanımındaki artışın kül inceliğindeki artışla olduğunu gözlemlemişlerdir. 28 ve 56 günlük hafif beton numuneleri, normal ağırlıktaki betonlar için gereken beklentileri karşıladığını ve sonuçta uçucu kül pelet ürünlerinin ideal kombinasyonları standart betonla eşdeğer davranıştaki hafif betonların özelliklerine ulaşmıştır.

Shafigin'in [32] 2016 yılında yaptığı çalışmada beton endüstrisi doğal kaynakların yüksek hacimde tükenmesinin en büyük sebeplerinden biri olduğunu ve beton gereksinimi büyüdükçe endüstrinin çevreye negatif etkilerini minimize etmenin efektif yollarından birinin de betonda çimento ve agrega yerine atık madde ve yan ürün malzemelerinin kullanılması olduğunu vurgulamıştır.

Yapmış olduğu çalışmada yüksek miktarda atık madde kullanarak hafif agrega betonu üretim olanağı değerlendirilmiştir. Atık madde olarak palmiye yağı kabuğu iri agrega olarak, F sınıfı uçucu kül ise çimento olarak kullanmışlardır. Mekanik özellikler; basınç dayanımı, farklı koşullarda, çekme-ayrılma dayanımı, eğilme dayanımı, yoğunluk, ultrasonik geçiş hızı, su emilimi bir yıl kadar incelemişlerdir.

Tüm yüksek hacimde uçucu kül içeren palmiye yağı kabukları betonları kalıplarının çıkarılması için yeterli mukavemete sahip olduğunu gözlemlemişler ayrıca bunlar önceki çalışmalara göre %46-60 oranında daha düşük çimento içermekte ve benzer basınç dayanımında olduğunu saptamışlardır. Ayrıca yüksek hacim uçucu kül kullanımı palmiye yağı kabuğu içeren betonda kısa süreli mekanik özelliklerin azaltmıştır fakat kireçtaşı tozu kullanımı erken ve geç evrelerde basınç dayanımını arttırdığını bulmuşlar.

Lo ve Cui [33], 2004 yılında yapmış olduğu çalışmada gözenekli agreganın dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Hafif betonun yüzeyindeki gözeneklerin yüzey karakteristiğini incelemişlerdir. Çalışmalarında şişmiş haldeki kilden elde edilmiş sentetik agrega hafif agrega olarak, ince agrega olarak kum kullanmışlar. Hafif beton 450 kg/m<sup>3</sup> çimento ve 0,36 su/çimento oranıyla üretmişler. Betonun basınç dayanımları 7. günde 46,5 MPa ve 28. günde 51 MPa olarak ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda hafif agreganın gözenekli yüzeyi, agrega ile çimento macunu arasındaki ara yüzey bağına çimento pastasıyla arasındaki yüzey bağına kenetlenen bölgeler oluşturmak suretiyle arttırmıştır.

Rossignolo vd., [34] 2003 yılında yapmış oldukları çalışmada ince prefabrik elemanlar üretmek amacıyla seçilen Brezilya hafif agregaları ile hazırlanmış olan 5 karışımı incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Akışkanlığı,(başlangıç ve 2 saat sonra) hava içeriği, basınç dayanımı, çekme dayanımı, elastisite modülü, ve deformasyonu incelemişlerdir. 7 günlük basınç dayanımı 39,7 MPa ila 51,9 MPa arasında, yoğunluğu 1460-1605 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları pilot çalışma sonucunda Brezilya agregalarıyla, yüksek performanslı hafif beton kullanarak, ince prefabrik elemanlar üretme olasılıkları olduğunu gözlemlemişlerdir. Taze haldeyken Brezilya agregalarıyla oluşturulan hafif betonun yapışkanlığı ve işlenebilirliğini iyi olduğunu söylemişlerdir. Hafif agregaları kuru kullanmış olmalarına rağmen, yüksek dayanımlı hafif beton 2 saat sonra iyi bir işlenebilirlik göstermiş ve basınç dayanımları normal betondan daha az olmakla beraber, daha iyi bir malzeme verimliliği oranı gösterdiğini bulmuşlardır.

Tangtermsirikul ve Wijeyewickrema'nın [35] 2000 yılında yapmış oldukları çalışmada uçucu kül agregasının dayanımını tahmin etmek için bir metot önermişlerdir. Topaklaşmış agreganın dayanımı uçucu kül agregalı betonun

dayanımını tahmin etmede önemli bir faktör olduğunu söylemişler. Basit noktasal yük testiyle, küre şeklindeki topağın çekme dayanımı, matematiksel denklem kullanılarak bulmuşlardır. Daha sonra değişik kimyasal bileşimlere sahip uçucu küllerle yapılan agregaların 30 günlük çekme dayanımı, agrega yapımında kullanılan uçucu kül-çimento gibi hammaddelerin eşdeğer CaO oranına bağlı olacak şekilde bir fonksiyonla ifade etmişlerdir. Çalışmanın sonucunda uçucu kül agregasının çekme dayanımı, uçucu kül agregasını oluşturan hammaddelerin içerdiği eşdeğer CaO içeriği arttıkça ve 14 ten 91 güne kadar zamana bağlı değişen çekme dayanımı 30 günlük çekme dayanımı kullanılarak tespit edilebileceğini bulmuşlar. Buradaki eşdeğer CaO oranıyla uçucu külü oluşturan hammaddelerin ağırlıkça yüzdesi, kimyasal analizindeki uçucu kül miktarlarının toplamı ifade edilmiştir (Eş. 2.1).

$$(CaO)_{eq} = (r \times (CaO)_c + (1-r) \times (CaO)_f) / 100 \dots \dots \dots (Eş. 2.1)$$

r: Uçucu kül agregası üretimi için uçucu kül-çimento bileşimindeki Portland çimentosunun ağırlıkça yüzdesi

(CaO)<sub>c</sub>: Çimento içerisindeki CaO içeriği

(CaO)<sub>f</sub>: Uçucu kül içerisindeki CaO içeriği

ve eşdeğer CaO oranı arttıkça dayanımın arttığı da görülmüştür ve şu denklemlerle ifade edilmiştir (Eş. 2.2).

$$\sigma_t (30gün) = 0.104 (CaO)_{eq} \dots \dots \dots (Eş. 2.2)$$

$\sigma_t$  (30gün): 30 gündeki gerilme mukavemeti ve eşdeğer CaO içeriği arasındaki ilişki

Chih-Ta Tsai vd., [36] 2012 yılında yaptığı araştırmada inşaat artığı malzemeleri soğuk bağlama yöntemiyle iri agregaya dönüştürmüş ve ürettikleri iri agregaları, beton yapılarında yeniden kullanım ve atıkların geri dönüşümü açısından kullanılabilirliğini ve ilerleyen dönemlerde bu atıkların kullanımının enerji tüketimini azaltılabileceğini söylemişlerdir.

### 3. GENEL BİLGİLER

#### 3.1. Uçucu Kül Tanımı ve Özellikleri

Termik santrallerde öğütülmüş kömür, basınçlı hava ile kazanlara püskürtülür ve yakılır. Yanma sonucu pulverize uçucu kül olarak adlandırılan çok ince tanecikli bir atık malzeme ortaya çıkar. Bu atık malzeme de elektro filtreler vasıtasıyla yanma bacalarının çıkışlarında tutulur. Daha ağır yanmamış malzeme ise fırının tabanına düşer. Buna taban külü denilir [1,37,38]. Türk Standartları Enstitüsü'nde (T.S.E), uçucu küllerle ilgili iki adet standart mevcuttur. Bu standartlar TS EN 450 ile TS 639 dur. TS 639 standartında uçucu kül, linyit kömürünün veya taş kömürünün toz halinde veya öğütülmüş şekilde kazanlarda yüksek sıcaklıklarda yakılması sonucu baca gazları ile birlikte hareket eden alümino silisli küçük taneli yanma artığıdır [39]. TS EN 450 standartına göre ise uçucu kül,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  den meydana gelen kütleye en az %25 oranında reaktif  $\text{SiO}_2$  içeren camsı ve küresel taneciklerden oluşan ince tozdur [40]. Uçucu kömür küllerinin içerikleriyle ilgili incelemeler 19. yüzyılda başlamıştır. İlk araştırmalarda pulverize uçucu külün istenen değerde pozolanik özellik gösterebilmesi için kömürün yanma sıcaklığının yüksek olması ve hızlı bir şekilde soğutulması gerektiği saptanmıştır. Betonlarda katkı malzemesi olarak kullanım potansiyelinin araştırması 20. yüzyılın başlangıcından itibaren [41]. İlk istenilen kalitedeki uçucu kül Cleveland Elektrik Aydınlatması Firması ve Detroit Edison Firmalarına ait termik santrallerden elde edilen uçucu küllerdir [42]. Davis vd. tarafından 1937 yılında beton karışımlarında uçucu küllerin katkı malzemesi olarak kullanılması üzerine ilk çalışmayı yayınlamışlar [43,44]. 1948 yılında ilk olarak Hungry Horse Barajının inşaatında ilk kez uçucu kül kullanılmıştır. Bu baraj inşaatında dökülen betonlar yaklaşık ağırlıkça %32 oranında uçucu kül içermektedir [43,45]. Türkiye'de ise 1960 yıllardan sonra uçucu küller baraj betonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Türkiye'de Devlet Su İşleri (D.S.İ) tarafından yürütülen iki yıllık detaylı ve geniş ölçekli araştırma programından sonra 1968'den 1973'e kadar geçen süre içerisinde, Eskişehir'de bulunan Porsuk ve Gökçekaya Barajlarının yapımında hidrasyon ısının düşmesi amacıyla yaklaşık 55000 tonun üzerinde uçucu kül kullanılmıştır. 1970 yılında ise Kütahya-Tavşanlı Yolunun bir bölümünün yapımında aynı şekilde uçucu kül çimento karışımı ile

zemin stabilizasyon çalışması yapılmıştır. Çimento sanayinin uçucu külle tanışması ise yine 1970'lerde olmuştur. Bu yıllarda Afyon ve Balıkesir Çimento Fabrikalarında, Soma ve Seyitömer Termik Santrallerinden temin edilen uçucu küller kullanılarak deneme amaçlı çimento üretimi gerçekleştirilmiştir [46]. Gün geçtikçe enerjiye bağımlılığın ihtiyacın artmasıyla Dünya'daki bütün gelişmiş ülkelerde paralel olarak kömür tüketimi artmış ve termik santral sayısı da çoğalmıştır. Termik santral sayısındaki artış beraberinde doğal atık malzeme miktarında da (uçucu kül, taban külü, cüruf vb.) artışa neden olmuştur. Yapılan araştırmalar sonucunda; 1993 yılı istatistiklerine göre 40 milyon ton, 2005 yılı değerlerine göre 120 milyon ton, 2012 verilerine göre ise bu rakamın 210 milyon ton olduğu ve son dönemde yapılan araştırmalarla 750 milyon ton civarında olduğu belirlenmiştir [4,47].

### **3.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması**

Uçucu küller kimyasal kompozisyonları dikkate alınarak farklı şekillerde sınıflandırılır. Sınıflandırmada TS EN 197-1 ve ASTM C 618 kriterlerine uygun standartlarla açıklanır.

ASTM C 618 standartında uçucu küller F ve C sınıfı olarak ayrılmaktadır.

Toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla ve CaO yüzdesi %10'dan düşük olan, bitümlü kömürden elde edilen ve düşük kirece sahip küller F sınıfı uçucu kül olarak isimlendirilirler. Puzolanik özellikte olan bu sınıftaki küller aynı zamanda düşük kalsiyum içerikli olup yüksek derece kömür gruplarından bitümlü kömürler veya antrasitlerin yakılmasından elde edilir.

Toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %50-70 arasında olan linyit veya yarı bitümlü kömürden meydana gelen küller C sınıfı uçucu kül olarak adlandırılırlar. Çimento özelliğine sahip (su ile reaksiyona girdiğinde kendiliğinden sertleşir) bu küller puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özellikte olmasının yanında CaO içeriği %10 üzerinde olması nedeniyle yüksek kireçli uçucu kül olarak da isimlendirilirler.

F ve C sınıfı uçucu küller arasındaki başlıca fark, küldeki kalsiyum, silika, alümina ve demir içeriğidir. F sınıfı uçucu külde, toplam kalsiyum, tipik olarak silis ve

alüminyum bir arada bulunurken, çoğunlukla kalsiyum hidroksit, kalsiyum sülfat ve camsı bileşenler %1-12 arasında değişen oranlarda bulunur. Diğer bir fark ise, sınıf C uçucu külden, sınıf F uçucu külden daha alkalilerin (kombine sodyum ve potasyum) ve sülfatların ( $SO_4$ ) miktarının genellikle daha yüksek olmasıdır [48].

Uçucu küller kalkersi (W) ve silissi (V) olarak Türk Standartları'nın Avrupa Standartlarına göre (TS EN 197-1'de) iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır [49].

1. V sınıfı uçucu küller, temel olarak reaktif silisyum dioksit ( $SiO_2$ ) ve alüminyum oksitten ( $Al_2O_3$ ) meydana gelen ve ayrıca demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) ve diğer oksitleri içeren, genellikle puzolanik özellikte olup, küresel taneciklerden meydana gelen küllerdir. Reaktif kireç (CaO) miktarı %10'dan düşük, reaktif silis oranı ise %25'ten yüksektir.

2. W sınıfı küller ise, reaktif silis ( $SiO_2$ ), reaktif kireç (CaO), alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) ve diğer bileşenlerden meydana gelen hidrolik ve/veya puzolanik özellikteki küllerdir. Reaktif kireç (CaO) miktarı %10'dan yüksek, reaktif silis miktarı ise %25'ten yüksektir.

Uçucu küller içerdiği kireç (CaO) miktarına göre de sınıflandırılmıştır. Bu son yıllarda oldukça kabul gören bir sınıflandırma çeşididir.

1. Düşük kireçli/kalsiyumlu uçucu kül CaO oranı %10'dan düşük,

2. Yüksek kireçli/kalsiyumlu uçucu kül CaO oranı %10'dan yüksek olmak üzere iki kısımda incelenir [48].

Uçucu kül, yapısındaki kireç (CaO) ve kükürt trioksit ( $SO_3$ ) oranına göre de üçe ayrılır. Bunlar;

a)  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  (S+A+F) toplamı %70'in üstünde olan siliko aluminatlardan oluşan ve taşkömüründen temin edilen siliko alüminalı uçucu kül,

b) S+A+F toplamı %50-70 arasında olan, yapısında silika bulunan, linyitten elde edilen ve kireç miktarı fazla olan siliko kalsik uçucu kül,

c) S+A+F toplamı %50'in üstünde olan, linyit kömüründen elde edilen, diğerlerine göre yüksek  $SO_3$  ve CaO içeren sülfatlı kalsik uçucu küllerdir [50].

### 3.1.2. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin tane boyu dağılımında ve tane şeklinde, kömürün cinsi ve tekdüze olması, inceliği, eşit oranda yanma durumu, yanma sıcaklığı ve yanma sırasında oksijen seviyesi gibi etkenler etkili olmaktadır [51].

Uçucu külün rengi, yanmamış karbon miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Genellikle bu renk, bronz gri ile siyah arasında değişir [52].

Kömürün yanma özelliğine bağlı olarak renginde (koyuluk, açıklık) birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. Yanmanın tam gerçekleşmediği durumlarda uçucu külün siyah renge sahip olmasına neden olan yanmamış karbondur, fakat iyi yanma ürünü uçucu küller diğerine nazaran daha açık renkte olmaktadır [53].

Uçucu küllerin özgül ağırlıkları genellikle 2,1-3,0 g/cm<sup>3</sup> arasında değişirken, spesifik yüzey alanı 170-1000 m<sup>2</sup>/kg arasında değişiklik gösterebilir [54,55].

Uçucu küller çimentodan daha yumuşak bir malzemedir. Ağırlıklı olarak küre biçiminde, katı veya oyuk olan ve çoğunlukla camsı (amorf) doğada ince, toz halindeki taneciklerden oluşur. Bu taneciklerin boyu 0,5 µm-150 µm arasında değişmektedir. Uçucu küldeki karbon içerikli malzemeler köşeli taneciklerden oluşur [52].

Şekil ve büyüklük bakımından taneciklerin farklılık göstermesine, uçucu külün çeşitliliği (düşük veya yüksek kireçli) neden olmaktadır [56].

Kireç içeriği yüksek olan küllerde ise mikro yapı içinde küresel ve köşeli şekil dağılımının yanında, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması söz konusudur [57].

Taze betonun su ihtiyacı üzerinde, taneciklerin şekil ve boyut dağılımlarının etkisi vardır. Bu etkinin küresel taneciklerde kayganlaştırıcı özelliklerinin yanında dolgu malzemesi niteliğinde oluşu, şekilsiz ve yüzeyleri pürüzlü olanlarda ise su ihtiyacını arttırıcı yönde olmasıdır. Uçucu külün tane büyüklük dağılımı bakımından değişkenlik göstermesi su ihtiyacını arttırmaktadır. Uçucu küllerin çoğunun 40 µm altında granülometrik bileşiminin yanında genellikle küre şekilli olması puzolanik aktiviteye olumlu yönde etki etmektedir. Özellikle büyük yüzey alanına sahip,



pürüzsüz yüzeyli ince küresel tanecikler, kireç-silikat tepkimelerine daha hızlı girmektedirler. Kireç miktarı fazla olan külün aktivasyonunda kristalize anhidrit ve kireç gibi aktif fazlara camsı fazın etkisi bulunmakla birlikte, kireç içeriği düşük olan küllerde ise tanelerin camsı fazın fazla olması, şekil, büyüklük dağılımı ve önem teşkil etmektedir [56].

Genel olarak uçucu küllerin yüzey alanları yüksek olup, tane boyuna göre 1-16 m<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup> arasında değişiklik gösterir. Uçucu küllerin içlerinin boş olmaları ve küresel yapıda olmalarından ötürü elektrik ve ısı iletkenlikleri oldukça düşüktür ve bu sebeple iyi birer yalıtıcıdır [58].

### 3.1.3. Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Mineralojik ve kimyasal özellikleri itibariyle uçucu küller, içi boşluklu ve boşluksuz, camsı yapılar, gözenekli ve absorbe özellikteki mineral parçacıkları, yanmamış taneciklerden ve köşeli aglomera tanelerden meydana gelmektedir [59,60].

Uçucu külün kimyasal özellikleri, yakılan kömürün özelliklerine, taşıma ve depolama için kullanılan teknikler sebebiyle büyük ölçüde etkilenir. Temel olarak proses koşulları, kimyasal bileşim, kül içeriği ve jeolojik köken gibi etkenlere bağlıdır. Kimyasal yapılarında çeşitli miktarlarda temel element olarak: Silisyum, alüminyum, kalsiyum ve kükürt bulunur (Çizelge 3.1).

Bu elementler yanma şekillerine bağlı olarak SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, demir oksitler (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), CaO ve SO<sub>3</sub> oluştururlar. Uçucu küllerdeki temel oksitler; SiO<sub>2</sub> (%60-65), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%10-30), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%1-15) ve CaO (%1-40) değerlerde bulunmaktadır [52].

Minör bileşen olarak, magnezyum oksit (MgO) maksimum %5, alkali oksitler (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) %5'in altındaki oranlarda, sülfür ise (SO<sub>3</sub>) %2-2,5 arasında bulunurken, bu değer kömürün yapısı ve proses koşullarına göre %10'a kadar çıktığı görülmektedir. TS EN 450 standartına göre SO<sub>3</sub> değeri en fazla %3 olarak belirlenmiştir [61]. Kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelen kızdırma kaybı olarak ifade edilen, kömürdeki karbonatların veya hidratların bozulması sonucu

meydana gelen bağlanmamış su veya karbondioksit kaybını da içine almaktadır. TS EN 450 standartı kızdırma kaybını %5 olarak belirlemiştir [56].

Uçucu küllerin matrisinde ise esas olarak alümina silikatlardan ve bunların yanında demir, magnezyum, potasyum, sodyum, kalsiyum, titanyum ve nadir toprak elementleri bulunmaktadır. Arsenik, kadmiyum, galyum, molibden, kurşun, selenyum ve çinko gibi elementler matrise girme eğilimi göstermezken, derişim tane boyu ile ters orantılı olarak uçucu küllerin yüzey kesimlerinde birikirler [53].

Çizelge 3.1. F ve C sınıfı uçucu küllerin majör oksit değerleri [45]

Oksit	F sınıfı	C sınıfı
SiO <sub>2</sub>	43,6 - 64,4	23,1 - 50,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,6 - 30,1	13,3 - 21,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8 - 23,9	3,7 - 22,5
CaO	0,7 - 6,7	11,5 - 29,0
MgO	0,9 - 1,7	1,5 - 7,5
Na <sub>2</sub> O	0,0 - 2,8	0,4 - 1,9
Kızdırma Kaybı	0,4 - 7,2	0,3 - 1,9

F sınıfı uçucu küllerin kireç (CaO) miktarı %10'dan küçüktür. Bu sınıftaki uçucu küller sadece puzolanik özellik gösterirler, ancak C sınıfı uçucu küllerde ise kireç (CaO) oranı genellikle %10'dan fazladır. Kireç (CaO) miktarının yüksek olması küllerin az da olsa bağlayıcı nitelikte olduğunu gösterir [25,52].

Uçucu küllerdeki kireç miktarına bağlı olarak; içeriği az olanın camsı faz miktarı, yüksek olaninkinden daha fazladır. Kireç miktarı az olan uçucu küllerin mineral faz olarak; müllit (Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub>), hematit (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), manyetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), kuvars (SiO<sub>2</sub>) gibi mineraller bulunurken, kireç içeriği yüksek olan uçucu küllerde ise sayılanlara ek olarak; serbest kireç (CaO), anhidrit (CaSO<sub>4</sub>), trikalsiyum alüminat (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>), plajiyoklaz, gehlenit, feldispat gibi kalsiyum silikatlar içerirler [62].

Uçucu küllerin pH'ı kömürün kalsiyum ve kükürt muhtevasına göre 4,5-12 arasında değişim göstermektedir. Bu durumda kükürt içeriği yüksek kalsiyum içeriği düşük küller asidik küller, kükürt içeriği düşük kalsiyum içeriği yüksek küller bazik küllerdir [63].

### 3.1.4. Uçucu Külün Kullanım Alanları

Uçucu küllerin kullanımı esas olarak üç faktöre bağlıdır.

- Uçucu küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri önem arz etmektedir,
- Uçucu küllerin yapı malzemesi olarak kullanılacağı diğer uygulamalar için gerekli mühendislik şartları önemlidir,
- Uçucu kül kullanıcılar için zararlı etkiler yaratmamalıdır.

Yukarıdaki faktörleri dikkate alarak, deney ve araştırma yoluyla farklı kullanım alanları Çizelge 3.2’de sınıflandırılmıştır [46,64,65].

Çizelge 3.2. Uçucu küllerin farklı kullanım alanları [46,64,65]

<b>Kullanım alanları</b>	<b>Kullanım şekli</b>
Çimento	Hammadde, katkı ve ikame malzemesi olarak
Agrega	İnce agrega, iri agrega ve hafif agrega olarak
Beton, gözenekli hafif beton bloklar	Katkı ve ikame malzemesi olarak
Tuğla, Ateş tuğlası, Uçucu kül tuğlaları ve blokları	Katkı malzemesi olarak
Kerpiç	Bağlayıcı malzeme olarak
Yapı malzemeleri	Blok, panel, duvar, gaz beton, beton boru, cam, boya, seramik, plastik, harç, fayans, kaldırım
Çeşitli yapı ve uygulamalar	Baraj, otoyol, nükleer santral yapımında
Tarımsal uygulama	Toprak iyileştirmeleri
Geoteknik uygulamalar	Toprak stabilizörü, yapısal dolgu, kaldırım yapımı, set

### 3.1.5. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri

Uçucu küllerin çevreye verdiği etkiler çok ciddi boyutlardadır. Linyit ve düşük kaliteli kömürlerin termik santrallerde yakılması sonucu oluşan kül, kükürt ve radyoaktif içeriği olan zehirli gazlar çevreyi olumsuz yönde etkileyici bir etkisi vardır. İnce partiküller olarak bilinen uçucu küllerin çevreyi kirletici etkilerinin önlenmesi için baca filtrelerinde toplanması, kül depo alanlarının yetersizliği, bu yetersizlik neticesinde toprak, yer altı ve sızıntı sularının kirletilmesi bilinen en büyük çevresel etkilerdendir [66].

Termik santrallerin bacalarından çıkan kükürt dioksit ve nitrik oksit vb. gazların çevreye yayılması sonucunda asit yağmurları meydana gelmektedir. Bacalardan çıkan kükürt gazı ortalama 2-7 gün içerisinde atmosfere rüzgârlarla taşınırlar ve buradaki su parçacıkları diğer bileşenlerle reaksiyona girerek sülfüroz asit ve sülfirik asit meydana getirmekle birlikte, benzer şekilde toprağa inerek taban suyuyla birleşmesi sonucu sülfirik asit şekline dönüşen kükürt dioksitin bitki köklerine zarar vermesi sonucunda bitkilerin besin ve su iletim mekanizmalarını işlevlerini yapamaz duruma getirmesi sonucunda orman ölümleri meydana gelmektedir [67].

Yanma artığı olan bu küller genellikle geniş hacimli havuzlar veya düzenli depolama sahalarında depolanmaktadır. Özellikle kadmiyum, arsenik, baryum, krom, kurşun, cıva, selenyumdan oluşan toksik metaller büyük tehlike yaratabilirler. Potansiyel olarak zehirli (toksik) elementler uçucu külden liç olabilir ve toprağı, yer altı suyunu ve yüzey suyunu kirletebilir. Liç çalışmaları kül havuz atım teknikleri ile beraber çevresel etkiyi tahminde büyük öneme sahiptir [68].

Kömürle çalışan termik santrallerin deniz kıyısında işletilmesi halinde, NaCl (sodyum klorür) içerikli deniz sularının santralden verilen dumanla teması sonucu önemli miktarlarda HCl (hidroklorik asit) meydana gelebilir. Asit depolanmasının ormanların ve eko sistemlerin tahribine neden olduğuna dair güçlü ve ayrıntılı bulgular mevcuttur [69].

### 3.2. Kireçtaşı

Tüm sedimanter kayaçların toplam hacminin yaklaşık %10'unu temsil eden en yaygın kimyasal sedimanter kayaçtır. Bileşiminde %90'dan fazla  $\text{CaCO}_3$  içeren kayaçlara genel olarak kireçtaşı (kalker) denilmektedir [70].

Kireçtaşları belirli safsızlıklar dışında ana mineral olarak kalsit, dolomit, aragonit ve manyezit gibi minerallerden oluşmaktadır [71].

Kireçtaşlarının içindeki kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) çoğu zaman amorf olup, saf haldeki kireçtaşları kalsit ve çok az miktarda aragonit kristalleri içerirler [72].

Saf olduklarında bileşimlerinde %56 kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ), %44 karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) bulunmaktadır. İçerisinde kuvars tanecikleri, feldispat parçacıkları, pirit kristalleri, kil mineralleri, organik maddeler vb. de bulunmaktadır [70].

#### 3.2.1. Kireçtaşının Fiziksel Özellikleri

**Renk:** Kireçtaşlarının renkleri beyaz, sarı, gri ve siyah olabilir. Renk kayacın içine giren yabancı maddenin durumuna göre değişiklik gösterir. Sarı renk demir oksitlerden, siyah renk mangan ve organik maddelerden kaynaklanmaktadır. Kireçtaşının içinde çoğu zaman beyaz-sarı renkli kalsit damarları da gözlenmektedir [70].

**Doku ve kristal yapısı:** Kireçtaşlarının tamamı kristal yapıda olup homojenlik, düzenlilik, boyutlarına göre yoğunluk ve sertlik değerlerinde farklı türler arasında değişiklik gösterirler [73].

**Gözeneklilik ve ağırlıkça su emme:** Kireçtaşı %0,1-3, mermer %0,1-2, tebeşir %15-40, dolomit %1-10 arasında bir poroziteye sahiptir. Gözeneklilik ve organik madde içeriğine bağlı olarak ağırlıkça su emmede ise yüksek yoğunluktaki kireçtaşı için %0,4 civarındadır [74].

**Özgül ağırlık:** Aragonitin özgül ağırlığı 25°C'de 2,92 g/cm<sup>3</sup>, kalsitin özgül ağırlığı 2,72 g/cm<sup>3</sup>, dolomitin özgül ağırlığı 2,90 g/cm<sup>3</sup>, kireçtaşının ise 2,65-2,75 g/cm<sup>3</sup> arasında değerler alır [73].

**Görünür yoğunluk:** 110°C'de kurutulmuş karakteristik kireçtaşına ait görünür yoğunluk 1,5-2,3 g/cm<sup>3</sup> arasında değişir. Gözeneklilik oranına ve gözeneklerdeki su miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir [74].

**Dökme (yığın) yoğunluğu:** Kireçtaşının birim hacimdeki öğütülüp elenen miktarıdır. Görünür yoğunluğu 2,7 g/cm<sup>3</sup>, boyutları arasındaki oran 1,2 olan kireçtaşının yığın yoğunluğu yaklaşık 1,40-1,45 g/cm<sup>3</sup> civarındadır. Malzeme incilmesi halinde %25'e kadar artış görülmektedir. Görünür yoğunluğa, boyut dağılımı, tanecik şekli ve nem içeriği gibi etkenlere bağlıdır [75,76].

**Sertlik:** Kireçtaşının üzerine asit dökülünce köpürür; Dolomitler ancak sıcak asitte erimektedir. Kireçtaşları çakı ile çizilir ve sertlikleri 3'tür. Som (saf) olmayan gevşek türleri ise parmak arasında kırılabilir [70].

**Dayanım:** Kireçtaşı çeşitlerinden tebeşir ve marnın dayanım değerleri oldukça düşükken, mermer ve traverten oluşumları çok yüksek dayanım değerine sahiptir [73].

**Basınca karşı direnç:** Kireçtaşlarının basınca karşı direnci dokulara göre değişiklik göstermektedir. Sıkı ve kompakt olanlarının basınç direnci 2000 kg/cm<sup>2</sup> dir. Poroz ve boşluklu olanların ise basınç dirençleri 200 kg/cm<sup>2</sup> civarındadır [70].

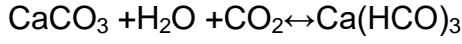
**Isı iletkenliği:** Kireçtaşları arasında çeşitlilik gösterir. 130°C'de farklı örnekler için ölçülen değerlerde; kireçtaşı için ölçülen değer 0,0039, dolomit için 0,0034, tebeşir içinse bu değer 0,0022 cal.cm/cm<sup>2</sup>.s.°C'dir. Bu değer gözeneklilik ve yapıya bağlı gibi durumlar göz önüne alındığında ısı iletkenliği sıcaklık artışıyla azalır [73].

**Erime noktası:** Kireçtaşlarının tamamında ergime olmadan önce oksitlerine dönüşüm olayı gerçekleşir. Kalsiyum oksidin erime noktası 2570°C iken magnezyum oksidin erime noktası 2800°C'dir [73].

### 3.2.2. Kireçtaşının Kimyasal Özellikleri

**Kimyasal stabilite:** Kalsit ve dolomit 600°C'ye kadar kesinlikle ayrışmazlar ve kimyasal olarak en kararlı maddeler arasındadır. Sıcaklığın yüksek olduğu durumlarda kireçtaşları ayrışarak kalsiyum okside dönüşür. Kireçtaşlarına su içinde kısmen ya da tamamen çözünebilen asitler etki etmektedir [73].

**Karbondioksitle tepkimesi:** Kireçtaşları CO<sub>2</sub> ihtiva eden sulara çözünme oranında artış gözlenir. Kireçtaşı, çift yönlü bir reaksiyon ile Ca(HCO)<sub>3</sub>' e (kalsiyum bikarbonata) dönüşür [73].



**pH değeri:** Kireçtaşlarının pH değerleri kendi aralarında çeşitlilik gösterir. Örneğin; dolomitin sudaki pH değeri 9-9,2 arasındayken, kalsitin sudaki pH değeri 8-9 arasında değişmektedir [77].

**Asitlerle tepkimesi:** Kireçtaşları genel olarak tüm kuvvetli asitlerle tepkime göstererek CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkarırlar dolayısıyla asit nötralizasyonunda kullanılır [73].

**Termal bozulma:** Kireçtaşının en önemli özelliklerinden biri olan termal bozulma (ayrışma) tüm karbonatlı kayaçlar yüksek sıcaklıklarda CO<sub>2</sub> gazı açığa çıkararak oksitlerine dönüşürler. Bu durum sıcaklığın etkisiyle karbonatlı parçalanması anlamına gelen kalsinasyon olarak da adlandırılır [77].

### 3.2.3. Kireçtaşının Kullanım Alanları

Kireçtaşları genellikle inşaat ve yol yapım malzemesi olarak mıcır şeklinde, çimento üretiminde, kireç üretiminde, cam üretiminde, metalürji sanayisinde, tarım sektöründe, şeker üretiminde, boya sanayinde, seramik sanayinde, su filtrasyonunda, kimya sanayinde ve kâğıt üretimi gibi çeşitli alanlarda

kullanılmaktadır [78]. Kireçtaşı çok yaygın kullanılan bir kayadır. Kireçtaşının önemli özellikleri sırasıyla;

-Kirecin ana maddesi,

-Mermeri oluşturan yapı taşı,

İnsanlığın varoluşundan bugüne kadar tüm evlerde, yollarda sıklıkla kullanılması, çimento ve asfaltın keşfedilmesinden bu yana çimento üretiminin %60'ında hammadde, beton ve asfalt dökümünde mıcır malzeme olarak kullanılmasıdır. Çimento üretiminde %5 daha az kuvars, magnezyum oksit ve pirit içermelidir. Mıcır, blok taş veya levha olarak kullanılması durumunda sertlik ve rijitlik önemli olmasından ötürü kil içermemesi gerekir. Çünkü killi kireçtaşı düşük sertlikte ve dağılgandır [70].

Dünya genelinde mıcır kullanımı yaklaşık olarak yılda 1,5 milyar tonken, Türkiye'de ise bu rakam yaklaşık 280 milyon tondur. Bu rakam, Türkiye'deki toplam kireçtaşı üretiminin yaklaşık %75'ine tekabül etmektedir [79]. Kireçtaşının kullanım alanlarından bir diğeri de çimento üretimidir. Çimentonun ana hammaddesini yaklaşık %80 oranında magnezyum içeriği maksimum %5 olan kireçtaşları oluşturur. Bir ton çimento üretmek için yaklaşık bir ton kireçtaşı kullanılmaktadır [80].

### 3.3. Portland Çimentosu

İngiltere'de James Parker 1796 yılında doğal hidrolik çimento üzerine bir patent çıkarmıştır (Yanlışlıkla Roman çimentosu olarak adlandırılmıştı). Bu çimento kil içerikli ve saf olmayan kireç taşı tanelerinin kalsinasyonu ile üretilmiştir. 6 yıl sonra Fransa'da Vicat (çimentonun priz süresini tayin etmek için kullanılan ve hâlâ geliştirdiği ilkelerden yararlanılmaktadır) kireçtaşı ve kilin sentetik karışımın kalsinasyonu ile suni hidrolik kirecini hazırlamıştır. 1822 de İngiltere'de James Frost aynı bulguyu İngiltere'ye de taşımıştır [81].

21 Ekim 1824 tarihinde İngiliz duvar ustası Joseph Aspdin tarafından kalker (kireçtaşı) ve kil karışımından oluşan ince taneleri pişirmesiyle ilk Portland çimentosunu üretmiştir. Portland adasından getirdiği doğal yapı taşına benzerliği,



çimento özellikleri ve renk gibi özelliklerinden dolayı çimentoya Portland çimentosu ismini vermiştir [82]. Yeterli sıcaklıkta pişirilmediği için bazı problemler görülmüştür. Üzerindeki problemleri 1845 yılında İngiliz Isaac Johnson, iyi pişirme sonucunda geliştirmesine yol açarak bugün dünyanın hemen her yerinde Portland çimentosunu kullanılabilir hale getirmiştir [83].

Çimentolar içerisinde bakıldığında bugün en yaygın olarak bilinen çimento türü Portland çimentosudur. Günümüzde Portland çimentosunun üretimi çok az veya özel istekler doğrultusunda yapılmaktadır. Bunun nedeni, diğer çimentolara nazaran pahalı olmasındandır. Diğer çimento türlerinin çoğunun bileşimlerinde yer almaktadır [84].

### **3.3.1. Portland Çimentosu Üretimi**

Portland çimentoları temel olarak kalker (kireçtaşı) ve kil olmak üzere iki hammaddeden oluşmaktadır. Üretimde öncelikli olarak uygun değerlerde, silis ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve kireç ( $\text{CaO}$ ) içeren hammaddelerin belirli miktarda karıştırılmasıyla  $1450^\circ\text{C}$ - $1550^\circ\text{C}$  arasında pişirilme işlemi gerçekleştirilmektedir. Fırından çıkarılan katı-sıvı etkileşimi sonucu oluşan malzeme klinker olarak adlandırılır. Klinker ani olarak soğutulur ve ardından öğütülür. Öğütülme esnasında klinkere %3-5 oranında alçıtaşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ilave edilir. Bu işlemin gerçekleştirilmesinin sebebi beton priz sürelerini tayin etmektir.  $90 \mu\text{m}$ 'nin altına kadar öğütülmüş ve tane boyutu açısından toz halindeki malzemeye "Çimento" adı verilir ve bağlayıcı özelliktedir [81].

### 3.3.2. Portland Çimentosunun Bileşimi, Kompozisyonu ve Kimyasal Özellikleri

Depodan veya inşaat malzemeleri satan bir satıcıdan alınan genel amaçlı sıradan bir Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.3'deki gibidir. Portland Çimentosu; Trikalsiyum silikat ( $C_3S$ ), Dikalsiyum silikat ( $C_2S$ ), Trikalsiyum alüminat ( $C_3A$ ) ve Tetra kalsiyum alümino ferrit ( $C_4AF$ ) olmak üzere dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bileşenler sırasıyla Alit, Belit, Felit ve Celit ismiyle de tanınır [85].

Çizelge 3.3. Sıradan Portland çimentosunun tipik kimyasal kompozisyonu [86]

Kimyasal İsim	Bileşen İsim	Kimyasal Formül	Kısaltılmış Formül	Ağırlıkça Yüzdeler
Trikalsiyum Silikat	Alit	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$	55-65
Dikalsiyum Silikat	Belit	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$	10-20
Trikalsiyum Alüminat	Felit	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$	7-12
Tetra kalsiyum Alümino ferrit	Celit	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	$C_4AF$	8-12

Bu 4 adet karma bileşenin bazı özellikleri vardır [85].

**$C_3S$ :** Hızlı bir şekilde sertleşmektedir. Temelde priz başlangıç süresini ve erken yaşlardaki dayanımı üstünde etkisi vardır.  $C_3S$  yüzdesi ile erken yaşlardaki dayanım doğru orantılıdır.

**$C_2S$ :** Sertleşmesi oldukça yavaştır ve 7 günden daha büyük yaşlardaki dayanım artışı üzerinde etkilidir.

**$C_3A$ :** Erken yaşlardaki dayanım üzerinde etkisi çok azdır. Klinkerin öğütülmesi sırasında eklenen Alçı taşı  $C_3A$ 'nın hidratasyon hızını yavaşlatmaktadır. Alçı taşı eklenilmediğinde  $C_3A$  katkılı çimento hızlı bir katılaşma gösterir.

**$C_4AF$ :** Klinkerleşme sıcaklığının düşürerek çimento üretiminde fayda sağlar. Hızlı bir şekilde hidrate olmasına rağmen dayanım kazanımında etkisi oldukça azdır.

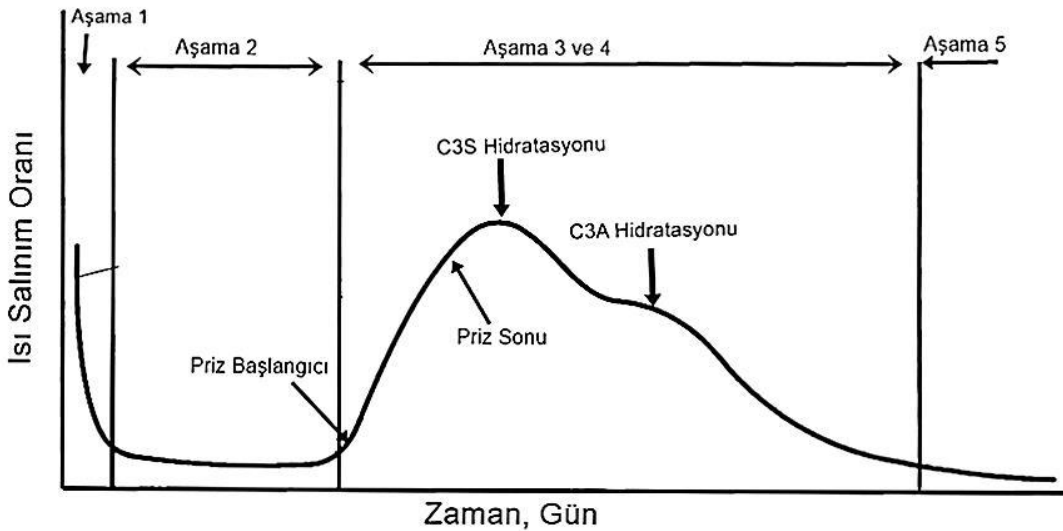
Çimento bileşenlerinin hidrasyon karakteristikleri ve çimento özelliklerine olan katkısı Çizelge 3.4'de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çimento ana bileşiklerinin hidrasyon karakteristikleri [86]

Çimento özelliği	Ana bileşenler			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Reaksiyon hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidrasyon ısısı	Orta	Az	Çok	Orta
Erken yaşlardaki dayanım	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
İleri yaşlardaki dayanım	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

### 3.3.3. Portland Çimento Hidratasyonu

Birkaç gün içinde çimento içindeki bileşenlerin hidrasyon hızlarındaki ortalama  $C_3A > C_3S > C_4AF > C_2S$  şeklinde olup reaksiyon hızları çeşitli faktörlerle değişkenlik gösterebilir. Portland çimentosu içerisinde hidrasyon hızları yaklaşık olarak aynıdır. Ancak  $C_3A$  reaksiyonu alçıtaşı ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) ile kontrol edilmektedir. Portland çimento hidrasyonuna ait şematik gösterimi Şekil 3.1'deki gibidir. 5 aşamalı bir reaksiyon olup; [81]



Şekil 3.1. Portland çimentosunun hidrasyon aşamalarının şematik gösterimi [81]

**1.Aşama:** Bu aşamada çimentonun su ile etkileşimi sırasında çok hızlı bir reaksiyon gerçekleşir ancak oldukça kısa sürelidir ve hemen yavaşlamaktadır. Bu

aşamadaki reaksiyon ıslanma reaksiyonudur ve çimento içerisindeki serbest CaO bu esnada reaksiyonda sönmüş kireci oluşturur.

**2.Aşama:** Beton için en önemli aşamadır. Beton burada plastik haldedir ve işlenir durumdadır. Bu aşamanın adı indüklenme olarak da tanımlanabilir. Bu aşama yaklaşık 2-3 saat sürebilir ve çimento cinsine, katkı durumuna göre değişir.

**3.Aşama:** En fazla hidrasyon bu aşamada gerçekleşir.  $C_3S$  ve  $C_3A$  bu aşamada reaksiyona girer. Bu aşama hızlanma periyodu olarak da adlandırılır. Beton burada priz işlemini tamamlar ve sertleşmeye bu dönemde başlar.

**4.Aşama:** Reaksiyon belli pik noktasından sonra azalma gösterir. Bu aşamaya yavaşlama periyodu adı verilir. Oldukça uzundur ve iyice durağan bir döneme girer.

**5.Aşama:** Bu aşamada ise beton artık iyice sertleşmiş ve oldukça fazla dayanım kazanır. Yıllarca süren bir aşamadır ve çok düşük hidrasyon reaksiyonu şeklinde devam eder.

### 3.3.4. Portland Çimentosu Tipleri ve Bileşimleri

TS EN 197-1'de yenilenen standarda göre Portland çimentoları ve diğer çimentolar CEM Çimentosu olarak isimlendirilmiştir. Klinkerde herhangi bir standart olmadığından klinkerde aranan nitelikler çimento standardına dahil edilmiştir.

Gerekli tanımlar;

**CEM Çimentosu:** Öncelikli kalsiyum silikatların hidrolik sertleşmesinin hidrasyonu sonucu oluşan, yapısında kütlece en az toplam %50 oranında reaktif CaO ve  $SiO_2$  olduğu, içeriğinde Portland çimentosu klinkeri, alçı ve çeşitli mineraller bulunan çimentoya denir [81].

**Portland çimentosu klinkeri:** Hassas bir oran ile birleştirilip ince öğütülmüş haldeki farin olarak adlandırılan ham çimento karışımının döner fırınlarda yaklaşık olarak  $1450^{\circ}C-1550^{\circ}C$  sıcaklıkta pişirilmesi sonucu temin edilen, bileşiminde kalker ve kilin CaO,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$  gibi oksitlerini içeren, yaklaşık 1 cm çapında topakçıklardır. Minimum kütlece 2/3 oranında kalsiyum silikat içermesi ve

CaO/SiO<sub>2</sub> oranı 2'den az olmaması gerekir. MgO içeriği en fazla %5 olarak sınırlanmaktadır [87].

TS EN 197-1, 2012 standardı Portland imentolarını iki temel tipte isimlendirmiştir. Bu iki temel tipte toplam 20 adet Portland imento tipi vardır ve izelge 3.5'de gösterilmiştir [88].

**CEM I:** Portland imento

**CEM II:** Portland - Kompoze imento

Çizelge 3.5. TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak üretilen Portland çimentolarının tipleri, ana çeşitleri ve içerikleri [88]

Ana tipler	Çimento tipi	Çimento işareti	İçeriği (kütlece % olarak)
<b>CEM I</b>	Portland Çimento	CEM I	95-100 klinker
	Portland-Cürüflu Çimento	CEM II/A-S	80-94 Klinker + 6-20 Yüksek fırın cürufu
CEM II/B-S		65-79 Klinker + 21-35 Yüksek fırın cürufu	
<b>CEM II</b>	Portland-Silis Dumanlı Çimento	CEM II/A-D	90-94 Klinker + 6-10 silis duman
	Portland - Puzolanlı Çimento	CEM II/A-P	80-94 Klinker + 6-20 doğal puzolan
		CEM II/B-P	65-79 Klinker + 21-35 doğal puzolan
		CEM II/B-P	80-94 Klinker + 6-20 doğal kalsine puzolan
		CEM II/B-Q	65-79 Klinker + 21-35 doğal kalsine puzolan
	Portland - Uçucu Küllü Çimento	CEM II/A-V	80-94 Klinker + 6-20 silisli uçucu kül
		CEM II/B-V	65-79 Klinker + 21-35 silisli uçucu kül
		CEM II/A-W	80-94 Klinker + 6-20 kalkersi uçucu kül
		CEM II/B-W	65-79 Klinker + 21-35 kalkersi uçucu kül
	Portland - Pişmiş Şistli Çimento	CEM II/A-T	80-94 Klinker + 6-20 pişmiş şist
		CEM II/B-T	65-79 Klinker + 21-35 pişmiş şist
	Portland - Kalkerli Çimento	CEM II/A-L	80-94 Klinker + 6-20 kalker
CEM II/B-L		65-79 Klinker + 21-35 kalker	
CEM II/A-LL		80-94 Klinker + 6-20 kalker	
CEM II/B-LL		65-79 Klinker + 21-35 kalker	
Portland - Kompoze Çimento	CEM II/A-M	80-94 Klinker + 6-20 cüruf, silis dumanı, puzolan, uçucu kül, şist, kalker	
	CEM II/B-M	65-79 Klinker + 21-35 cüruf, silis dumanı, puzolan, uçucu kül, şist, kalker	

Klinkere eklenen mineral sembolleri:

Bazı çimentolar katkı olarak puzolan, yüksek fırın cürufu, kalker gibi malzemeler klinkere katılmasıyla üretilir. Katkı maddeleri harfler ile simgelenmiş ve çimento tanımlamasında kullanılmıştır.

**A, B:** Katkılı

**A:** Katkısı az

**V:** Silisli uçucu kül

**B:** Katkısı orta

**W:** Kalkersi uçucu kül

**T:** Pişmiş şist

**Q:** Doğal kalsine edilmiş puzolan

**S:** Yüksek fırın cürufu

**L:** Kalker

**D:** Silis dumanı

**LL:** Kalker

**P:** Doğal puzolan (tras)

**M:** Birden çok farklı katkı (kompoze)

### **3.3.5. Portland Çimentosunun Dayanım Sınıflaması ve Priz Süreleri**

Portland çimentolar için 32,5, 42,5 ve 52,5 olmak üzere üç farklı standart dayanım sınıfı belirlenmiştir [89].

TS EN 196-1 standardına göre bu değerler 28 günlük MPa olarak ifade edilen sıkışma dayanımları ile ilişkilidir. TS EN 197-1'de karakteristik değerler ifade edilmiş ve Çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

Ayrıyeten her standart dayanım sınıflaması için iki erken dayanım sınıfı tarifi yapmıştır. Bu sembollerden,

N: Normal erken dayanım sınıfını, R: Yüksek erken dayanım sınıfını belirtmektedir [87].

Dayanım sınıfları ve priz (katılaşma) süreleri;

Portland çimentoları minimum 32,5 N/mm<sup>2</sup>, 42,5 N/mm<sup>2</sup> ve 52,5 N/mm<sup>2</sup> olan 28 günlük sıkışma dayanımına göre üç farklı dayanım sınıfında üretilirler. İçerdiği katkı maddeleri ve üretim şekilleri nedeniyle aynı nihai dayanıma sahip

çimentoların 2.gün sonundaki dayanım değerleri farklı olur. Dayanımı normal olan çimentolara erken dayanımı normal çimento olarak isimlendirilir ve N harfi ile gösterilir. Dayanımı kazanımı çabuk olan çimentolara erken dayanımı yüksek çimentolar denir ve R harfi ile belirtilir [83].

Çizelge 3.6. TS EN 197-1 standartına göre Portland çimentolarının mekanik dayanımları ve fiziksel özellikleri [88]

Dayanım sınıfı	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)			Priz başlama süresi (dakika)	Genleşme (mm)
	Erken dayanım		Standart dayanım		
	2 günlük	7 günlük	28 günlük		
32,5 N	-	≥16,0	≥32,5	≤52,5	≥75
32,5 R	≥10,0	-	≥42,5	≤62,5	≥60
42,5 N	≥10,0	-	≥52,5	-	≥45
42,5 R	≥20,0	-	-	-	≤10
52,5 N	≥20,0	-	-	-	-
52,5 R	≥30,0	-	-	-	-

Bu çizelge sonuçlarına göre;

- Priz süresi (katılaşma) başlamadan önce (45-75 dakika içinde) beton yerinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmelidir. Priz başlangıcından itibaren betona hiçbir müdahale edilmemelidir. Beton dökümü adeta zamana karşı yarışır. Priz süresinin kısa olması açığa çıkan ısıнын da kısa sürede gerçekleşeceği anlamına gelir. Betonun kalıptayken çatlama ihtimali yüksektir.
- Priz süresinin sona ermesi (6-10 saat sonra) betonun katılaştığını ifade eder. Fakat henüz sertleşmemiştir. Hava sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda hemen kür (sulama) işlemine başlanılmalıdır.
- 52,5 R çimentosunun 2 günde eriştiği dayanıma 32,5 N çimento 28 gün sonra sahip olmaktadır. Kalıbın şayet hızlı alınması istenirse 52,5 R tipi çimento kullanılmalıdır [90].



### 3.3.6. Portland Çimentosunun Kimyasal Özellikleri

TS EN 197-1'de Portland çimentosu için öngörülen kimyasal bir takım özellikler Çizelge 3.7'de karakteristik değerler olarak gösterilmiştir [87].

Çizelge 3.7. Portland çimentosunun kimyasal özellikleri için karakteristik değerler [87]

Özellik	Standart	Çimento tipi	Dayanım sınıfı	Özellikler
Kızdırma kaybı	EN 196-2	CEM I	Hepsi İçin	≤ %5,0
Çözünmeyen kalıntı	EN 196-2	CEM I	Hepsi İçin	≤ %5,0
Sülfat miktarı (SO <sub>3</sub> ) olarak	EN 196-2	CEM I, CEM II	32,5 N, 32,5 R, 42,5 N	≤ %3,5
Klorür içeriği	EN 196-2	CEM I, CEM II	Hepsi İçin	≤ %0,10

### **3.4. Agregas**

Agregaların genel olarak tanımı, kum, çakıl, kırmataş gibi taneli malzemelerin imento ve su ile birlikte kullanılması sonucunda beton yapmak için kullanılan malzemeye verilen isimdir. Betondaki hacmin %60-85'ini oluşturan agreganın betonun dayanımını ve dayanıklılığı üzerinde etkisi vardır [91].

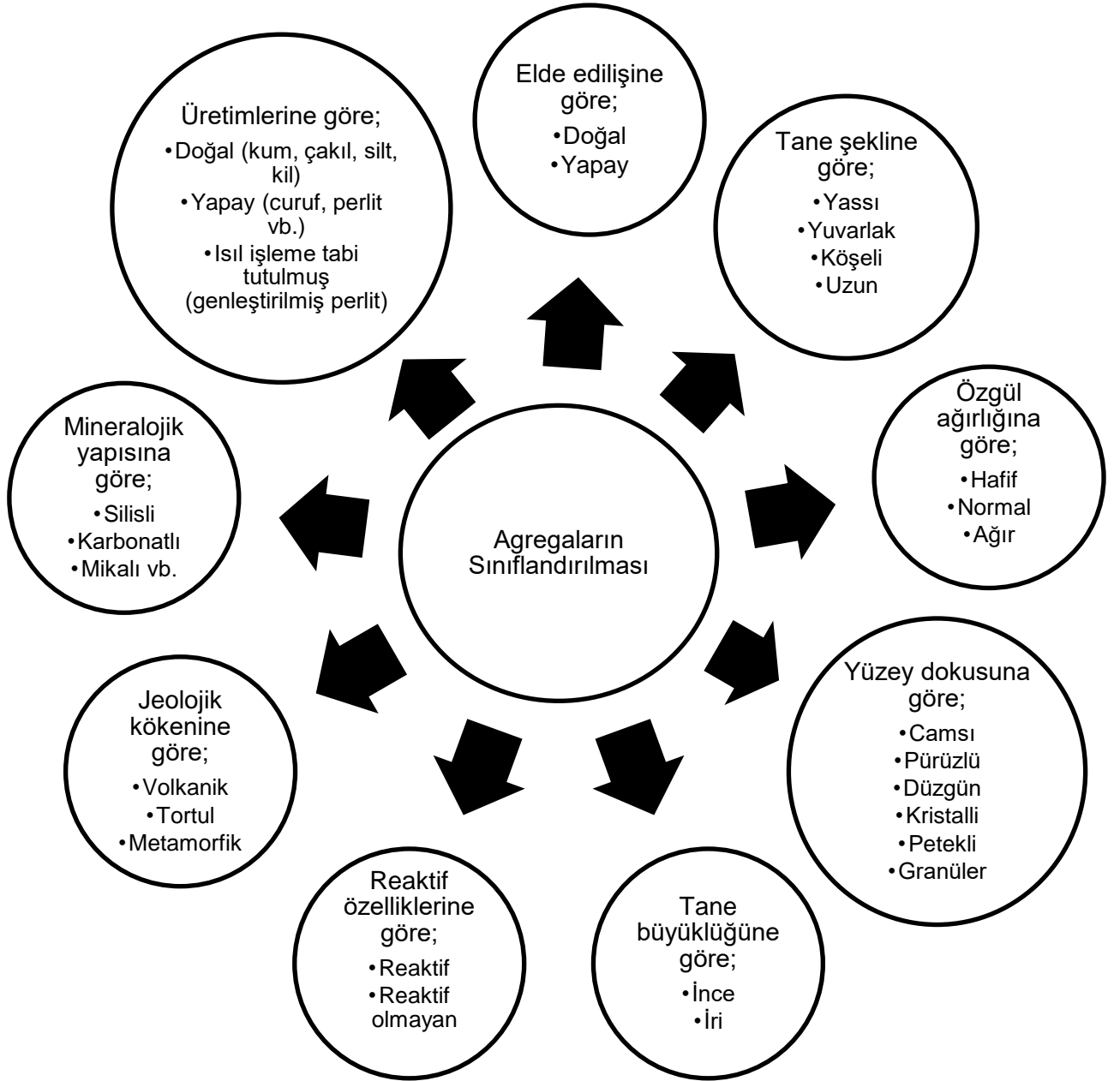
Beton agregası olarak tanımı, beton üretiminde veya harç yapımında bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilmiş, imento ve su karışımından meydana gelen, organik kökenli olmayan doğal veya yapay malzemenin genel olarak 100 mm.'yi geçmeyen hatta yapı amaçlı kullanılacak betonlarında çoğu zaman 63 mm.'yi aşmayan büyüklüklerdeki kırılmış veya kırılmamış tanelerden oluşan yığın olarak tanımlanır [92].

Beton yapımında çeşitli agregas türlerinden yararlanılır. Bunlar; kum, çakıl, kırma taş, yüksek fırın cürufu, pişmiş kil, bims, genleştirilmiş perlit ve uçucu külden elde edilen uçucu kül agregalarıdır [93].

Agregaların betonun büyük bir bölümünü oluşturduğundan, agreganın bütün özelliklerinin de bilinmesi gerekir. Agregalar, sağlam olmalı, suyun etkisiyle yumuşmamalı ve dağılmamalıdır. Özellikle betonda kullanılacak agregaların, imento içeriğiyle birlikte betonda zararlı bileşikler oluşurmamalı ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir. Tanelerin şekli, dokusu uygun olmalı ve tane boyutları bakımından dağılımları uygun standartlara göre yapılmalıdır. Agregas içinde zararlı maddelerinde bulunmamalıdır [102].

#### **3.4.1. Agregaların Sınıflandırılması**

Agregalarda birçok özelliklerine göre sınıflandırılabilirler (şekil 3.2). Ancak pratikte yaygın olarak kullanılan üç sınıflandırma seçilmiş ve aşağıda ayrıntılarıyla açıklanmıştır.



Şekil 3.2. Çeşitli agregaların sınıflandırılması [94]

## **Elde edilmiş şekillerine göre sınıflandırılmaları;**

Doğal agregalar: Akarsu yatağı (dere), deniz, buzul ve teras agregaları olarak incelenmektedir.

- a) Dere agregaları: Akarsu yataklarında rastlanan ve en fazla tercih edilen agrega çeşididir. Parçaları genellikle yuvarlak olup akıntı nedeniyle agregalar dağılmakla birlikte uygun granülometriye sahip olmaktadır. Sürüklenmeden dolayı oluşan aşınmadan dolayı zayıf parçalar kısmen üzerinde kısmen elenme meydana gelir. Temiz, düzgün ve doğal tanelerden oluşan dere agregalarından en iyi ve kaliteli malzemeler temin edilir.
- b) Deniz agregaları: İnce ve tekdüze tanelerden oluşurlar. Deniz kenarlarındaki midye, istiridye kabukları bazı durumlarda problem oluştururlar. Bu tip taneler agreganın yerleşmesini güçleştirirken dayanımını düşük taneler meydana getirirler.
- c) Teras agregaları: Yamaç (döküntü) birikintileri, dik ve yüksek yamaçlardaki kaya malzemelerinin kayması ve kopması sonucunda malzemelerin diplerde yığılmasıyla oluşurlar.
- d) Buzul agregaları: Gerçek ve nehir buzul depozitleri olmak üzere iki çeşittir. Gerçek buzul depozitleri, akarsu hareketlerine maruz kalmamalarında ötürü çok fazla üniformaluluk gösterirler. Bu tipteki agregalar betonda agrega olarak kullanımı uygun değildir. Ancak nehir buzul depozitlerinde ise, çoğunlukla uygun agrega malzemesi temini mümkündür [94].

Yapay agregalar: Yapay agregalar sanayi ürünü agrega olarak da bilinir. İkincil bir aşamayla beton yapımında değerlendirilir hale getirilirler. Bu tür agregalar yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek cürufu olan kırılmış veya kırılmamış haldeki agregalardır. Gözenekli yapılarından dolayı ses, ısı ve hacimleri bölme amacıyla üretilen betonlarda kullanılır. Bu agregalara örnek olarak tuğla veya kiremit verilebilir [89].

### **Birim ağırlıklarına göre sınıflandırılmaları;**

Bunlar hafif, normal, ağır olmak üzere üç grupta incelenir.

- a) Hafif agregalar: Hafif beton eldesinde kullanılır. Özellikle ısı ve ses yalıtımını artırmak amacıyla zaman zaman cüruf vb. artık malzemeleri değerlendirmek amacıyla kullanılan agregalardır. Betondaki birim ağırlığı azaltmak içinde kullanılır. Hafif agregalara örnek olarak sünger taşı, pomza, bims, tüfler, diyatomit, yüksek fırın cürufu, hızar talası, rende talası ve genişleştirilmiş kil, perlit, şist vb. isimler altında sıralanabilir. Boşluklu yapıya sahip olup su emmeleri ve boşluk oranları yüksektir. Yoğunlukları 2,4 ton/m<sup>3</sup>'ten küçüktür.
- b) Normal agregalar: Yoğunlukları 2,4-2,8 ton/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. En çok kullanılan agrega çeşididir.
- c) Ağır agregalar: İhtiyaç durumunda ağır beton üretmek için kullanılan agrega çeşididir. Doğal ağır agregalara örnek olarak barit, hematit, manyetit, limonittir. Yapay ağır agregalara örnek olarak, demir ve çelik hurdası verilebilir. Ağır agregalar su depolarında, nükleer santrallerde, hastanelerde röntgen odalarında geçirgenliği az kompasitesi yüksek yerlerde kullanılır. Yoğunlukları 2,8 ton/m<sup>3</sup>'ten büyüktür [94].

### **Tane boyutlarına göre;**

Tane boyutlarına göre agregalar; ince, iri ve karışık (tüvenan) agregalar olmak üzere üçe ayrılırlar.

- a) İnce agregalar (Kum): Doğal kum, kırma kum (ince mıcır) veya bunların karışımından elde edilen 4 mm kare gözlü elekten geçebilen agregalardır. Taneleri sert ve sağlam olmalıdır.
- b) İri agregalar (Çakıl): Doğal çakıl, kırma taş (iri mıcır) veya bunların karışımından temin edilen 4-63 mm arasındaki kare delikli eleğin arasında kalan agrega yığınıdır.
- c) Karışık (Tüvenan) agregalar: Doğrudan doğruya doğal agrega ocağından elde edilen elenmemiş haldeki ince ve iri agrega yığınıdır [89].

### 3.4.2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agregaların fiziksel özellikleri; porozite, özgül ağırlık, su bağıntısı, kompasite, birim ağırlık, dona karşı dayanıklılık vb. olup aşağıda alt bölümlerde detaylı olarak ifade edilmiştir.

#### 3.4.2.1. Agreganın Porozitesi

Tanelerin kökenine, yapısına ve granolümetrik yapısına bağlı olarak bir miktar su emerler. Agregada tanelerindeki boşluk, su emme deneyiyle tayin edilmektedir. İri agregada tanelerindeki boşlukların küçük olması ile bu tanelerin dayanımının yüksek olması beklenir. Bu durumda yüksek dayanımlı agregalar betonların mekanik dayanımında da artışa neden olur. İnce agregada porozite tespiti iri agregada olduğu gibidir. Farkı sadece su emmiş tanelerin kuruma işleminde vardır. Kap içinde ısıtmak suretiyle ve sıcak havayla yapılır [89].

#### 3.4.2.2. Agregada – Su Bağıntısı

Agregada-su bağıntısı;

- a. Agreganın emdiği suya,
- b. Tanelerin yapısı ve kökenine,
- c. Tane boyu büyüklüğü gibi bileşenlerine bağlıdır.

Agregada taneleri arasındaki boşluklarda su, Şekil 3.3a-d'deki gibi dört şekilde bulunur [94].

- a) Tamamen kuru taneler (fırın kurusu): Agregada tanelerinde hiç bir şekilde su bulunmamasıdır.
- b) Kuru yüzeyli taneler (hava kurusu): Tane iç kısımlarının boşluklarında bir kısım su ile dolu olması fakat tane yüzeyinin tamamen kuru olmasıdır.
- c) Yüzey kuru-suya doygun taneler: Yüzeyin tamamen kuru olması ve tane boşluklarında su olması halidir.

d) Islak taneler: Agregadaki boşluklarda suyun bulunması ve aynı zamanda yüzeyinde de serbest suyun olması halidir.



(a) Tamamen kuru



(b) Kuru yüzeyli



(c) Doygun kuru yüzeyli



(d) Tamamen Islak

Şekil 3.3. Agregatanelerinin suda görünüş şekilleri; (a) Tamamen kuru, (b) Kuru yüzeyli, (c) Doygun kuru yüzeyli, (d) Tamamen Islak [94]

### 3.4.2.3. Özgül Ağırlık

Belirli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin, havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtılmış haldeki suyun havadaki ağırlığına oranıdır. Hesaplama taneler arasındaki boşluk dikkate alınmaz. Bir agreganın özgül ağırlığı, elde edilen kayacın kökenine bağlıdır. Doğal agregaların büyük bir çoğunluğunun özgül ağırlığı  $2,6-2,7 \text{ kg/dm}^3$  arasındadır [95].

#### 3.4.2.4. Kompasite

Tanelerin kapladığı hacmin toplamı agreganın kompasitesini ifade eder. Agreganın özgül ve birim ağırlıkları bilindiği müddetçe, birim ağırlığın özgül ağırlığa bölümü ile agreganın kompasitesi hesaplanabilir. Agreganın özgül ağırlığı birim ağırlığından daima büyüktür. Dolayısıyla kompasite birden küçük değer alır [96]. Agreganın sıkıştırma prosedürü uygulanmadan yerleştirilmesi neticesinde kompasite 0,40-0,70 arasında değer alır. Kompasitesi düşük olan agregayla üretilen betonun kompasitesi ve mukavemeti düşük, dış etkilere karşı dayanıklılığın azalması ve kusurlu malzeme miktarının artmaya neden olmaktadır [89].

#### 3.4.2.5. Birim Ağırlıkları

Belirli bir hacimdeki kaba doldurulan agrega tanelerinin toplam ağırlığının kap hacmine bölünmesiyle elde edilir. Birim ağırlıklar gevşek ve kuru olmak üzere iki çeşittir. Kuru durumdaki agregayı sıkışmamış halde kap içerisine boşaltarak bulunan ağırlık gevşek birim ağırlık, belli sayıda şişlenerek bulunan ağırlığa da sıkışık birim ağırlık denir.

Birim ağırlıktan, granülometri bileşimi, malzemenin kusurlu olup olmaması hakkında bilgi edinilir. Ayrıyeten agrega içindeki boşluk miktarı hesaplanabildiği gibi, agreganın uygunluğu hakkında da yorum yapılabilir.

Birim ağırlığa etki eden faktörler;

1. Boşluk miktarı, agreganın tane büyüklüğüne göre değişiklik gösterir. Birim ağırlık değerinin atması boşluklardaki miktarın azalmasıyla açıklanır.
2. Deforme olmuş ve özürlü malzemenin fazla miktarda boşlukları atması birim ağırlıkta düşüğe neden olmaktadır.
3. V hacmindeki bir kalıba agrega yerleştirilmesi sırasında vibrasyon ve şişleme metotlarının uygulanması halinde kap içinde oldukça az boşluklara rastlanır ve bu durum da birim ağırlıkta artış gözlenir.



4. Agreganın özgül ağırlık değerinin yüksek olması, agrega ağırlığının fazla olduğunu gösterir ve bu durumda birim ağırlık artar [89].

Bir betonun taşıma gücü, dayanıklılığı ve dayanımı ne kadar fazlaysa, birim ağırlığı da o kadar yüksek olur. Beton agregalarının birim ağırlıkları 1,2-1,8 kg/dm<sup>3</sup> arasında değişir [97].

#### **3.4.2.6. Dona Dayanıklılık**

Don dayanıklılığı agrega bünyesinde bulunan boşlukların büyüklüğüne ve yapısına bağlıdır. Su adsorbe etmeyen agregalar donma-çözülme etkisine dayanıklıdır. Çapı 0,005 mm'den küçük boşlukları olan orta geçirgenlikteki agregaların donma-çözülme sonunda parçalandıkları gözlenmiştir. Donma sırasında boşluklar içinde bulunan su donarak boşluk cidarlarına basınç yapmakta ve kırılmalara neden olmaktadır. Dona karşı dayanım agregaların su emme özellikleri ile yakından ilişkilidir. Su emme özelliği fazla olan agregaların dona karşı dayanımları da o kadar düşük olur [98].

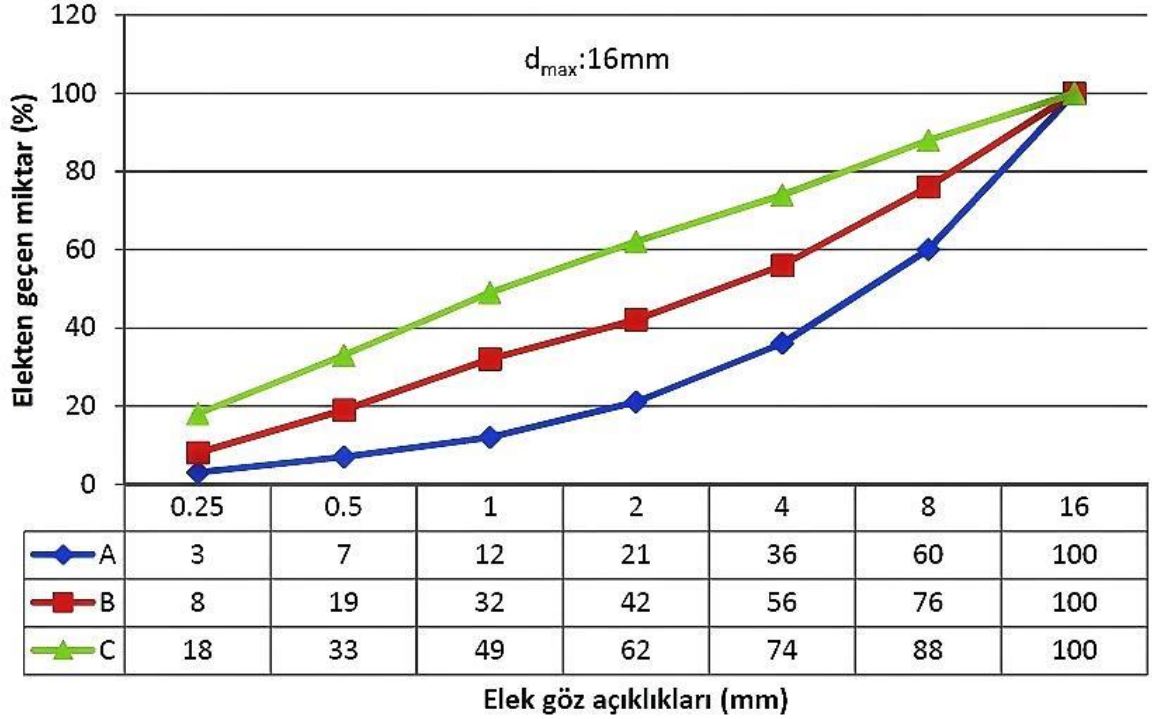
#### **3.4.3. Agreganın Granülometrisi (Tane Büyüklüğü Dağılımı)**

Agregayı oluşturan taneler değişik boyutta olabilir. Boyutları ayırma işleme eleme denir. Bu işlem bir veya daha fazla sayıda elek kullanarak taneleri gruplara ayırma işlemidir. Aynı agregada belirli tane boyundaki malzemeler, sürekli belirli miktarlarda bulunur. Granülometri tanım olarak bir agrega yığınının belli miktarda ve belli büyüklükteki tanelerden oluşmasına ve yığın içerisindeki bulunma miktarlarına denir [89].

Agrega yığınının tanelerin boyutlarına göre dağılımlarının belirlenmesi, özellikle beton üretiminde büyük önem taşımaktadır. Agreganın granülometrisinin beton üzerinde olumlu veya olumsuz yanları vardır. Nitelikli beton üretiminde kullanılacak agreganın boyutlara uygun dağılımı, betonda istenilen özellikleri sağlamalıdır. Agreganın kullanılmadan önce, elek analiziyle granülometrisinin belirlenmesi ve belirli sınırlar içinde olup olmadığı gözden geçirilmelidir. Bu sebeple ülkemiz yapı

sektörünce TS 706 EN 12620 tarafından belirlenmiş olan sınırlar dikkate alınır (Şekil 3.4) [99].

Beton karışım hesaplamalarında kullanılacak agreganın tane boyu dağılım oranları Şekil 3.4'de belirtilen A ve B eğrileri arasında olması durumunda, agreganın granülometrisi çok iyi, A ve C eğrileri arasında olduğunda kullanılabilir agrega olarak ifade edilir [100].



Şekil 3.4. Sınırlandırılmış granülometri eğrileri (A: Kabul edilen alt sınır, C: Kabul edilen üst sınır, B: İdeal karışım granülometrisi) [99]

#### 3.4.4. Agregaların Mekanik Özellikleri

**Agregaların basınç dayanımı:** Tek eksenli sıkışma dayanımının malzemenin porozitesiyle yakından ilişkilidir. Agreganın dayanımı, porozitenin küçük olması durumunda artar.

**Agregaların aşınmaya mukavemeti:** Bir yüzeyin sürtünme sonucunda meydana gelebilecek aşınmaya karşı koymasüdür. Dayanıklılık iki farklı yöntemle yapılmaktadır. Los Angeles Deneyi agregalar üzerinde yapılırken, BÖHME deneyi

71x71x71 mm bloklar üzerine yüzeysel aşınma şeklinde yapılır. Yol ve havalimanlarındaki beton zemin, çarpma ve korozyon etkisi altında olup, beton zeminin, bu etkilere karşı dayanım gösterebilmesi için iri agregaların çarpma ve korozyon etkilerine karşı yüksek dayanımda olması gerekmektedir.

**Agregaların çarpmaya dayanıklılığı:** Kullanılan agreganın önemli etkisi vardır. Çarpma dayanıklılık testinde agrega çelik silindir içine yerleştirilerek, belirli bir aralıktan, belirli bir ağırlık ve sayıda düşürülerek malzeme çarpma etkisine maruz bırakılır. Çarpma etkisi altında dayanıklılığı, agreganın elekten elenmesiyle birlikte fikir sahibi olunabilir [89].

### **3.4.5. Agregada Bulunabilecek Zararlı Maddeler**

Çimentonun hidrasyonunu etkileyen kirli maddeler; çürümüş bitki kalıntıları ve humus içeren topraklar vb. agrega yığını içerisinde ufak parçacıklar halinde bulunan organik maddelerdir. Ağırlıklı olarak ince agrega içinde bulunurlar. Yıkama işlemiyle iri agregaların büyük bir kısmı temizlenmiş olurlar.

Çimentonun prizini yavaşlatan bu organik maddeler dayanım ve dayanıklılığı olumsuz yönde etkilemektedir. Agregada ve çimento hamuru arasındaki bağlanma ve yapışmayı etkileyen maddeler; kil, silt gibi malzemeler agrega kütlesi içine karışmış veya tanelerin yüzeylerine yapışmış halde bulunan ince maddelerdir. Beton içindeki ince madde miktarı artması, işlenebilirliğin elde edilmesi için su ihtiyacının artmasına sebep olur. Malzemelerin agrega tanelerinin üzerini kaplamış olmalarından ötürü, dayanım ve dayanıklılık olumsuz yönde etkilenmektedir. Agregada tanelerinin bir parçasıymış gibi tanelerde yapışmış halde bulunan yumuşak ve mukavemeti düşük maddeler; kömür, odun gibi özgül ağırlıkları oldukça düşük hafif maddelerdir.

Agregalarda bulunan diğer zararlı maddeler gibi hafif maddelerin de, fazla olması durumunda betonun dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkiler. Örneğin su miktarındaki artış ve azalış durumlarında, hacimlerinde değişimler meydana gelir. Donma olayına maruz kaldıklarında kolaylıkla parçalanırlar. Ayrıca betonda lokal renk değişimleri meydana getirirler [95,101,102].

Nitrat tuzları, donatı korozyonuna neden olan etkiler oluşturabilir. Bu sebeple betonda kullanılacak agregalarda zararlı madde bulunmaması veya betona zarar vermeyecek şekilde olması gerekmektedir [96].

## 4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

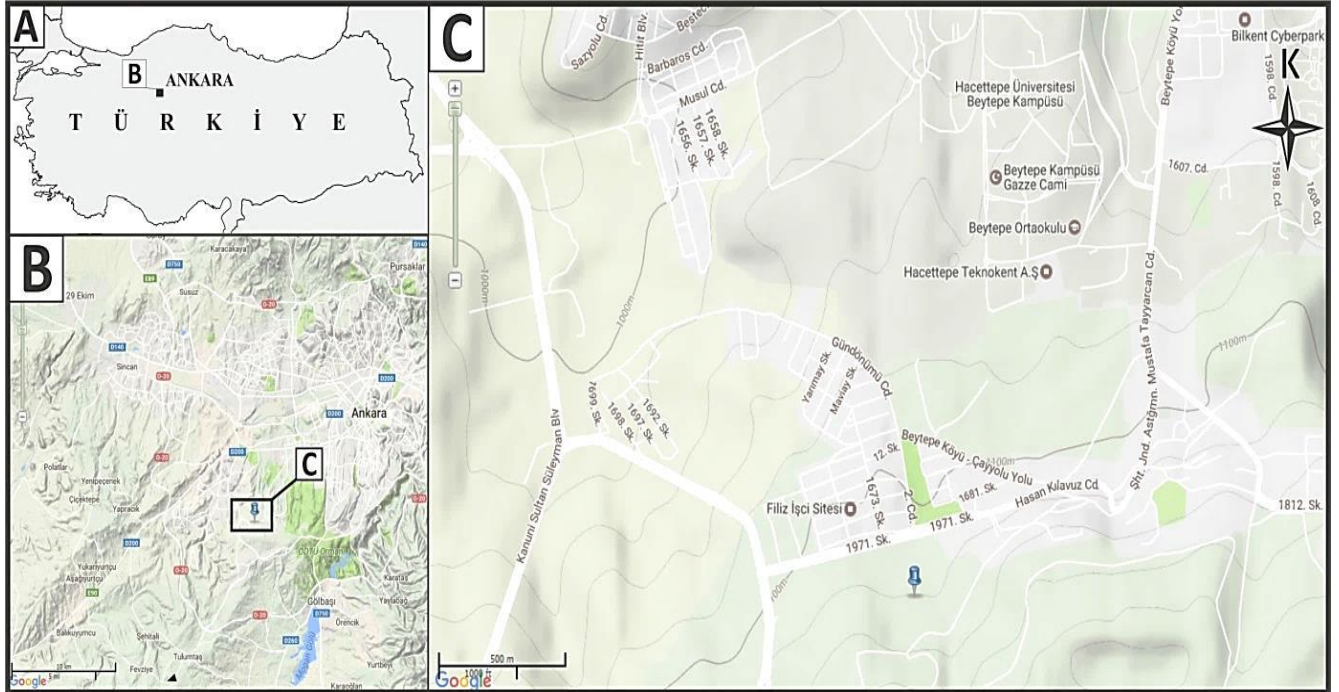
Arazi çalışmaları kireçtaşı agrega kaynağının belirlenmesi ve örneklemeden oluşmaktadır.

### 4.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak belirtilen alan, tez çalışmasında kullanılan kireçtaşı agregalarının temin edildiği taş ocağını ifade etmektedir. Bu nedenle kireçtaşı agregasının temin edildiği bölgenin jeolojisi aşağıda belirtilmiştir.

### 4.2. Kireçtaşı Ocağının Yeri

Kireçtaşı ocağı, Ankara'nın 14 km güneybatısında, Beytepe Köyü ve çevresinde yer almaktadır (Şekil 4.1).



Örnekleme  
Noktası

Şekil 4.1. Beytepe köyünden örnek alımı yapılan taş ocağının yeri

### 4.3. Açık Ocak İşletmesi Çevresinin Genel Jeolojisi

Çalışma alanı, Ankara'nın 14 km güneybatısında, Beytepe Köyü ve çevresinde yer almaktadır. Bölgede gerçekleştirilen arazi çalışmalarında yaygın olarak izlenen kireçtaşları, yanal devamlılık sunmamakta ve matriks içerisinde yerleşmiş düzensiz irili ufaklı bloklar şeklinde yüzlek vermektedir. Bu birim Türkiye'nin birçok yerinde geniş yüzlekler veren Karakaya Kompleksi dahilinde ele alınmaktadır (Şekil 4.2) [103].

Karakaya Kompleksi, Beytepe yerleşkesi civarında genellikle grovak (kumtaşı %15-75 matriks) blokları ile temsil edilmekte olup yerleşke güneyinde Beytepe Köyünde itibaren güneybatıya doğru Dereköy (Haymana) bölgesine kadar kireçtaşı blokları gözlenmektedir.

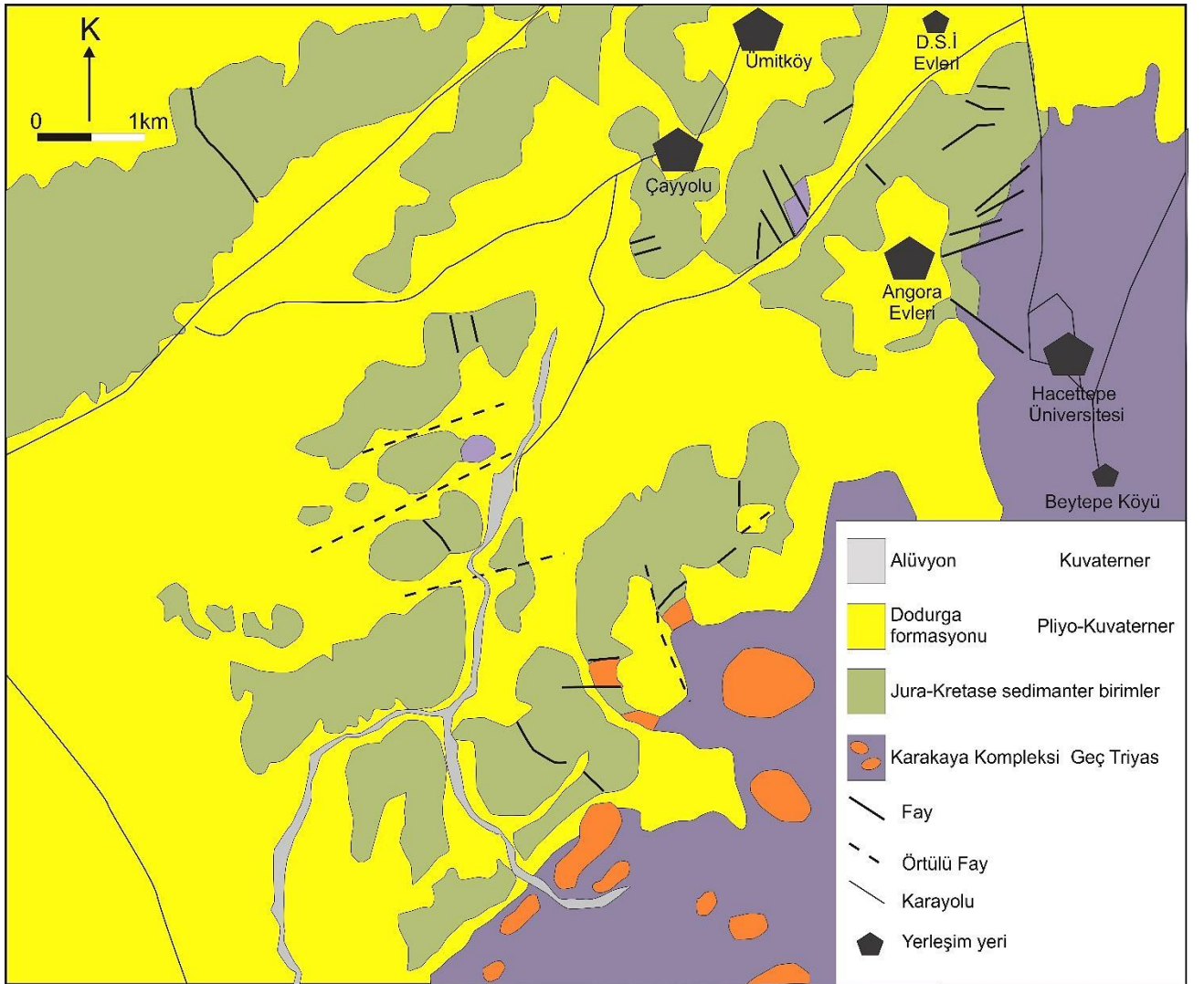
Bingöl vd., [104] Karakaya formasyonunu, içinde Permo-karbonifer yaşlı kireçtaşı blokları kapsayan, az metamorfizmaya uğramış spilitik bazalt, çamurtaşı, radyolarit, feldispatlı kumtaşı, kuvarsit, konglomera, silttaşı araldanmasından oluşan Erken Triyas yaşlı bir birim olarak ifade etmişler. Daha sonra aynı birim farklı araştırmacılar tarafından adlandırılmıştır. Bunlardan bazıları; Batman vd., [105] tarafından Hisarlıkaya formasyonu, Altiner ve Koçyiğit [106], Biga yarım adasında yaptıkları çalışmada benzer özellikteki kayaçları Olukman formasyonu olarak adlandırmışlardır. Formasyonu oluşturan birimler Okay vd., [107] tarafından Nilüfer, Çal, Hodul Birimleri ve Orhanlar Grovıkları olarak tanımlanmıştır.

Koçyiğit [108], Karakaya Kompleksinin Geç Triyas sonunda Paleo-Tetis ile birlikte denizel bir havzanın kapanması ile meydana geldiğini belirtmiştir. Çalışmada, Karakaya orojenik kuşağının Erken Permiyen-Geç Triyas aralığında, Türkiye kuzeyinin jeotektonik evrimi açısından önemli rol oynadığı belirtilmiştir. Tektono-sedimanter bir kompleks olan Karakaya Napı, üç alt tektonik birime ayrılmıştır. Sırası ile sığ denizel karbonatlar, volkano-sedimanter istif ve filiş-bloklulu melanj Karakaya Napının birimleri olarak ifade edilmiştir.

Okay ve Göncüoğlu [109], Karakaya Kompleksini iki ana bölüme ayırmış olup, çoğunlukla metamorfizma geçirmiş mafik lav, piroklastik kayaç, şeyl ve kireçtaşı araldanmasından oluşan bölümünü stratigrafik olarak muhtemelen alta

olmasından dolayı Alt Karakaya Kompleksi olarak tanımlamıştır. Stratigrafik olarak üstte yer alan Üst Karakaya Kompleksi dahilinde ise kırıntılı, karbonatlı, volkanik ve volkano-klastik kayalar izlenmekte olup karbonatlı kayalar içerisinde Karbonifer ve Permiyen yaşlı kireçtaşları baskındır.

Beytepe ve çevresinde yüzeylenen kireçtaşı bloklarında fusulinid bentik foraminifere dayalı gerçekleştirilen göreceli yaşlandırma ile blokların (?) Geç Karbonifer-Geç Permiyen yaşlı oldukları belirlenmiştir [110].



Şekil 4.2. Beytepe Köyü ve civarının jeoloji haritası (Deli ve Orhan [103]'dan değiştirilerek alınmıştır)

## 5. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

### 5.1. Kullanılan Malzemeler

#### 5.1.1. Çimento

Üretimi yapılan beton serilerinin ve hafif iri agregaların tamamında, Bolu Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini gösteren deney sonuçları sırasıyla Çizelge 5.1, Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3'te verilmiştir. Kimyasal analiz TS EN 196-2, fiziksel denemeler TS EN 196-3 ve TS EN 196-6, dayanım denemeleri ise TS EN 196-1 standartlarına uygun yapılmıştır. Çimento, TS EN 197-1 standardına uygundur.

Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun fiziksel özellikleri

Özgül ağırlık		Sonuç
Priz Süresi (Vicat)	Başlama (dakika)	140
	Bitiş (dakika)	160
Hacim Genleşmesi (Le Chatelier) (mm)		1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) (cm <sup>2</sup> /gr)	4663
	45 µm elek kalıntısı (%)	-
	90 µm elek kalıntısı (%)	4,08



Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri

<b>Kimyasal bileşimin tanımı</b>	<b>Kimyasal bileşimin yüzdesi</b>
SiO <sub>2</sub>	18,95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,07
CaO	64,72
MgO	1,35
SO <sub>3</sub>	2,9
Na <sub>2</sub> O	0,16
K <sub>2</sub> O	0,51
Serbest CaO	1,52
Çözünmeyen kalıntı	0,63
Kızdırma kaybı	3,83

Çizelge 5.3. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun mekanik özellikleri

<b>Gün</b>	<b>Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)</b>
7	44,6
28	55,3
90	62,4

### 5.1.2. Su

Üretilen hafif iri agrega ve beton üretiminde şehir su şebekesinden arıtılmasından elde edilmiş saf su kullanılmıştır. Ancak beton numunelerinin kür işlemlerinde şehir şebekesinden akan içme suyu kullanılmıştır. Şehir sularının hepsi birbirinin aynı kalitede olmaması ile birlikte içerdikleri yabancı madde miktarları beton özelliklerine zarar verecek seviyede değildir [111]. Bu nedenle kür suyu olarak şehir şebekesinden akan içme suyu kullanılmıştır.

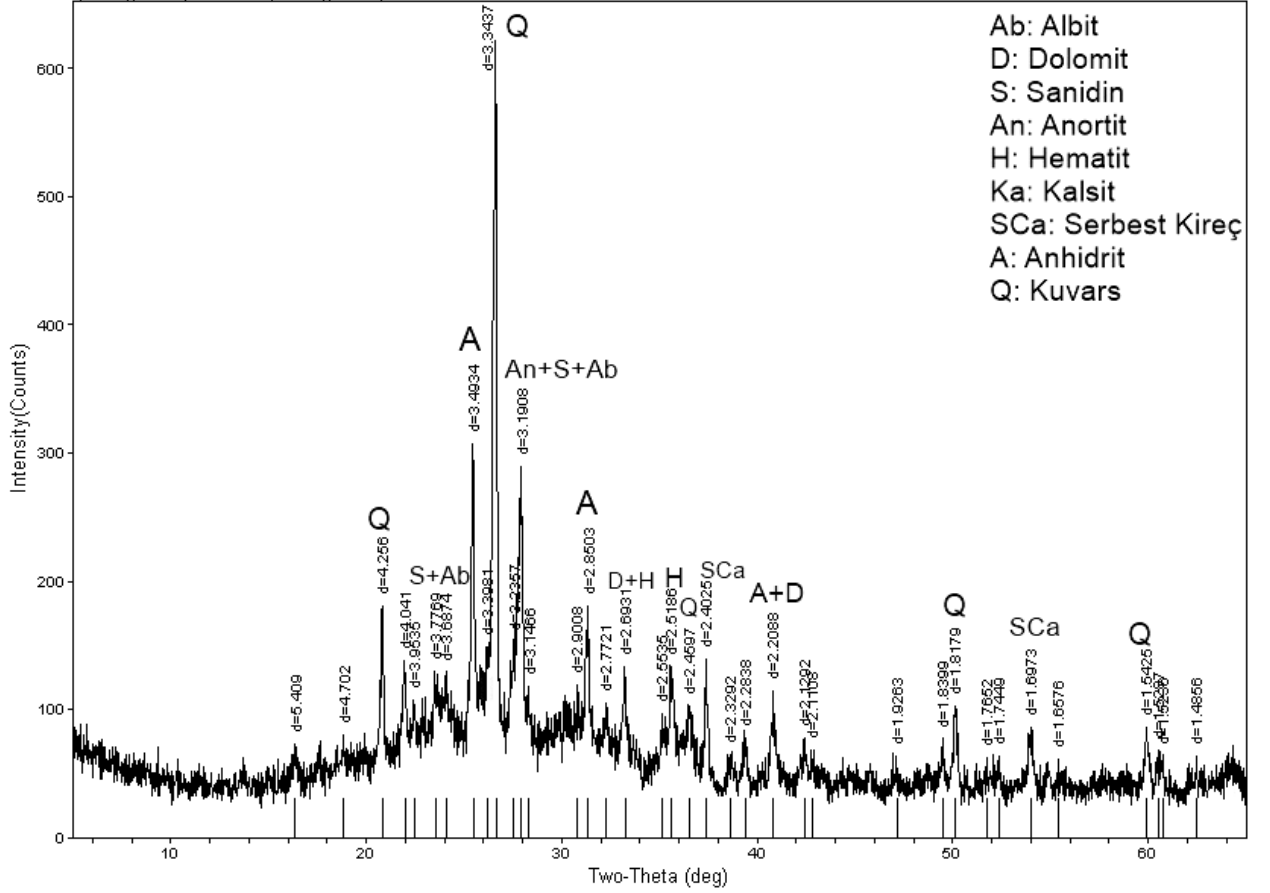
### 5.1.3. Uçucu Kül

Tez kapsamında kullanılan uçucu kül Yatağan termik santralinden temin edilmiştir Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin yapmış olduğu kimyasal analiz ve standartlara uygunluk ölçütlerine göre (Çizelge 5.4), Yatağan uçucu külünün TS EN 197-1 standardına göre reaktif kireç miktarı yaklaşık %10 olması nedeniyle W (kalkersi uçucu kül) sınıfına girmektedir. Ancak, ASTM C 618 standardına göre CaO içeriğinin %10'dan fazla olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına,  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$  (S+A+F) değerinin de %70'in üzerinde olmasından dolayı F sınıfı uçucu kül (silissi) sınıfına girmektedir. Bu sınıflamalara göre Yatağan uçucu külünün her iki sınıf için de limitte olduğu düşünülmüştür. Yatağan uçucu külü, TS 639 ve ASTM C 618 standartlarındaki  $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3>70$  olması şartını da sağlamaktadır [56].

Çizelge 5.4. Yatağan uçucu külüne ait kimyasal analiz sonuçları [56]

Standartlara Uygunluk Sınırları							
Oksit (%)	TS EN 450	TS EN 197-1			ASTM C 618		
		V	W	TS 639	F	C	
SiO <sub>2</sub>	51,5						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,08						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,07						
S+A+F	80,65			>70,00	>70,00	>50,00	
CaO	10,53						
MgO	2,42			<5,00			
SO <sub>3</sub>	1,32	<3,00		<5,00	<5,00	<5,00	
K <sub>2</sub> O	2,54						
Na <sub>2</sub> O	0,77						
Kızdırma Kaybı	1,06	<5,00	<5,00	<5,00	<10,00	<6,00	
Cl <sup>-</sup>	0,003	<0,10					
Serbest CaO	0,99	<1,00					
Reaktif SiO <sub>2</sub>	26,69	>25,00	>25,00	>25,00			
Reaktif CaO	9,02		<10,00	>10,00			

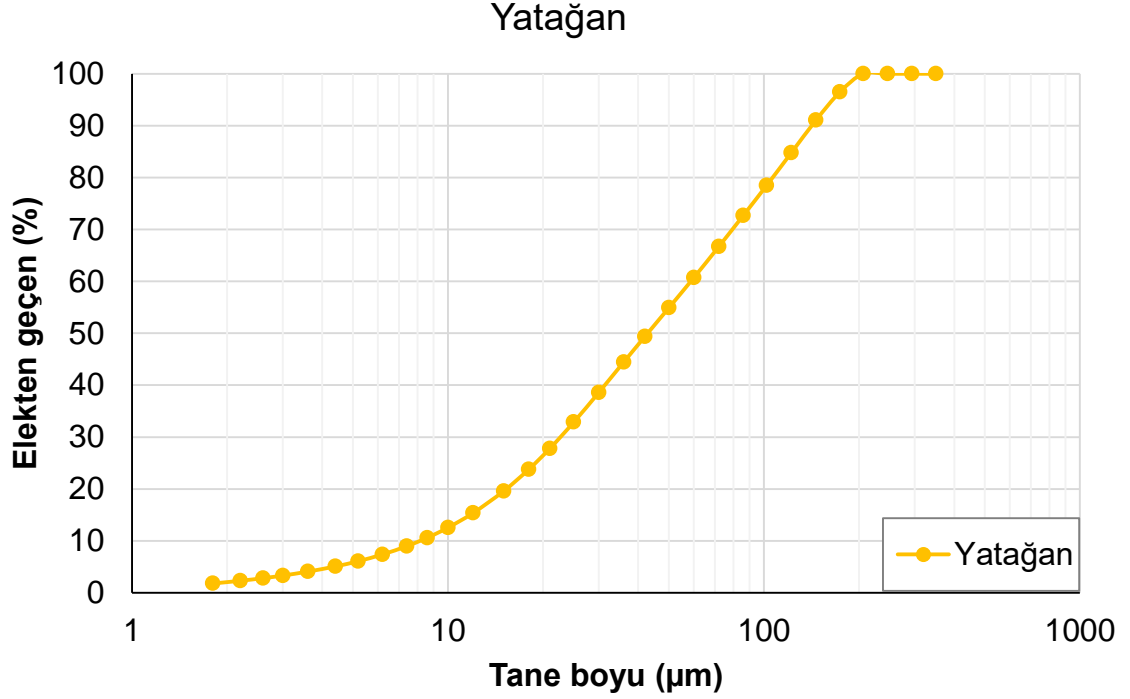
Yatağan uçucu külüne ait mineralojik bileşimi gösteren X-ışınları difraktogramı Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği bölümünde yapılmış ve Şekil 5.1'de verilmiştir. Yapısında kuvars, anortit, sanidin, albit gibi kristal içerikli fazlar yanında anhidrit, serbest kireç, dolomit ve hematit içeren diğer fazlarda bulunmaktadır.



Şekil 5.1. Yatağan uçucu külüne ait XRD görüntüsü

XRD sonucuna göre, Yatağan uçucu külüne ait difraktogramın,  $2\theta$  (derece) değerinin yaklaşık  $26-27^\circ$  de en yüksek durumda olması ve  $2\theta$  (derece) değerinin  $31-32^\circ$  olduğu bölümü de içine alacak şekilde yayılım göstermesi, fazın camı içeriğinin yanında hem kireçsi hem de silissi yapıda olması özelliği şeklinde ifade edilmiştir.

Yatağan termik santralinden temin edilen uçucu küle ait tane boyu grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2. Yatağan termik santralinden temin edilen uçucu küle ait tane boyu grafiği

#### 5.1.4. Kireçtaşı

Kireçtaşı ocağından temin edilen kireçtaşı blokları (Şekil 5.3) balyoz kullanılarak küçük parçalar haline getirildikten sonra, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği bölümünde çeneli kırıcı ile kırılıp elenerek agrega olarak kullanılabilir hale getirilmiştir (Şekil 5.4). Bu deneyle kırılmış örneklerin beton harç karışımında kullanılacak agregaların karışım oranlarını ve miktarlarını belirlemek amacıyla yapılmıştır. Deneyde kullanılan elekler, elek açıklığı en üstte büyük boyut olacak şekilde aşağıya doğru giderek küçülecek şekilde üst üste yerleştirilmiştir. Kuru haldeki örnekler en üstteki eleğin içine konulmuş ve eleme hareketlerine başlanmıştır. Bu şekilde elekler içindeki malzemeye yeterli bir süre sarsılma hareketi uygulanarak eleme işlemi sürdürülmüştür. Daha sonra elek üzerindeki malzemeler göz açıklıklarına göre ayrılmıştır.



Şekil 5.3. Beytepe Köyü'nden temin edilen kireçtaşı blokları



Şekil 5.4. Çeneli kırıcı ile kırılmış farklı tane boyutundaki kireçtaşı agregaları

Elek analizi ASTM C 136M-14 standardına uygun olarak, Çizelge 5.5'de ölçüleri verilen elekler kullanılarak yapılmıştır.

- 4 No'lu (4,75 mm) elek üzerinde kalan agregalar için iri agregalar (Şekil 5.5),
- 4 No'lu elekten geçen fakat 100 No'lu elek üzerinde kalan agregalar için ince agregalar (Şekil 5.6).

Kireçtaşı agregaları elendikten sonra eleme işleminde kullanılan elek üzerinde kalan malzeme tartılmıştır ve toplam ağırlık ince ve agregalar için ayrı ayrı hesaplanarak her elek aralığı için % kalan hesaplanmıştır (Eş. 5.1).

$$\%(\text{kalan}) = \frac{A}{B} * 100 \dots \dots \dots (\text{Eş. 5.1})$$

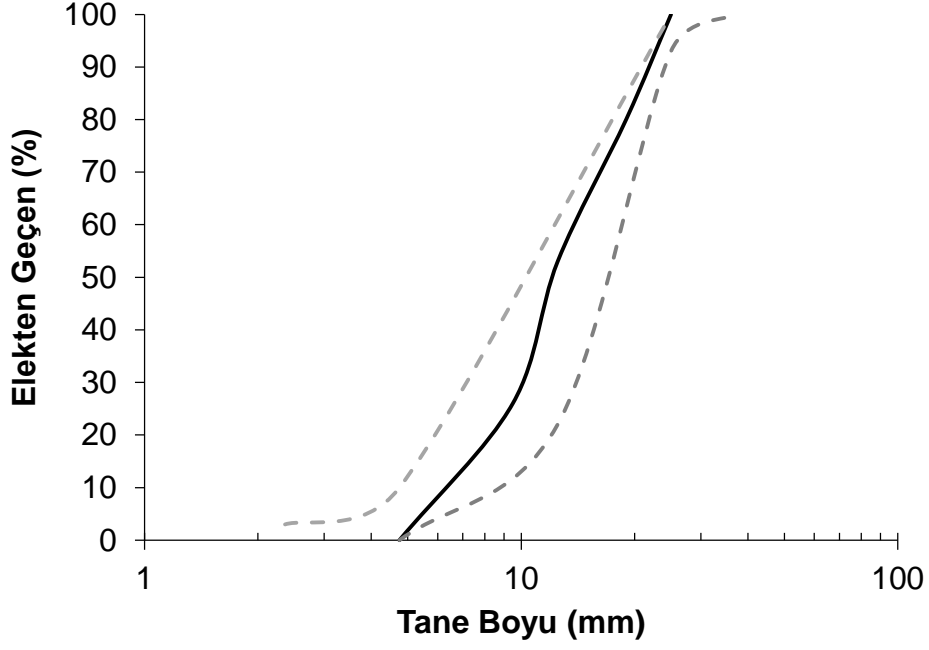
Burada;

A: Kullanılan elek üzerinde kalan numenin ağırlığı

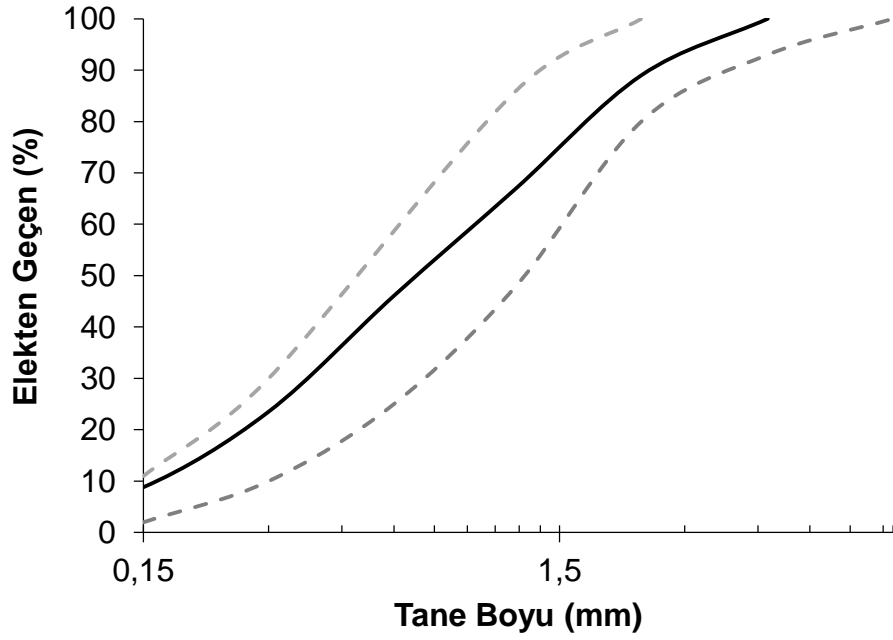
B: Toplam numune ağırlığı

Çizelge 5.5. Beton numunelerde kullanılan agregaların ASTM standartlarına göre elek numaraları ve boyutlarının sınıflandırılması

<b>Elek No</b>	<b>Boyut (mm)</b>
1"	25
(3/4")	19
(1/2")	12,5
(3/8")	9,5
No. 4	4,75
No. 8	2,36
No. 16	1,18
No. 30	0,6
No. 50	0,3
No.100	0,15



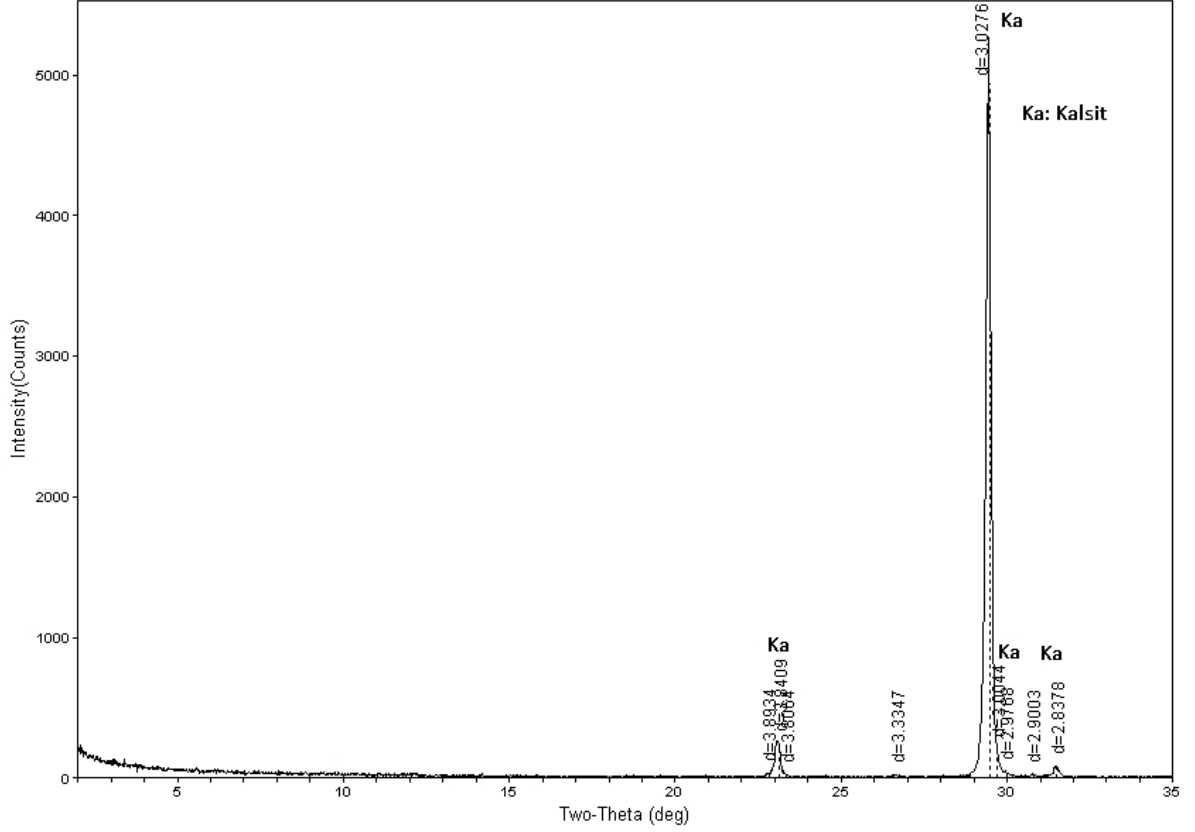
Şekil 5.5. Beton karışımında kullanılan iri taneli malzeme tane boyu dağılımı grafiği (Kesikli çizgiler standart alt ve üst sınırlar)



Şekil 5.6. Beton karışımında kullanılan ince taneli malzeme tane boyu dağılımı grafiği (Kesikli çizgiler standart alt ve üst sınırlar)



Temin edilen kireçtaşı örneklerine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 5.7’de verilmiştir. Difraktogram sonucuna göre kimyasal formülü  $\text{CaCO}_3$  olan kireçtaşının ana minerali kalsit olarak belirlenmiştir.



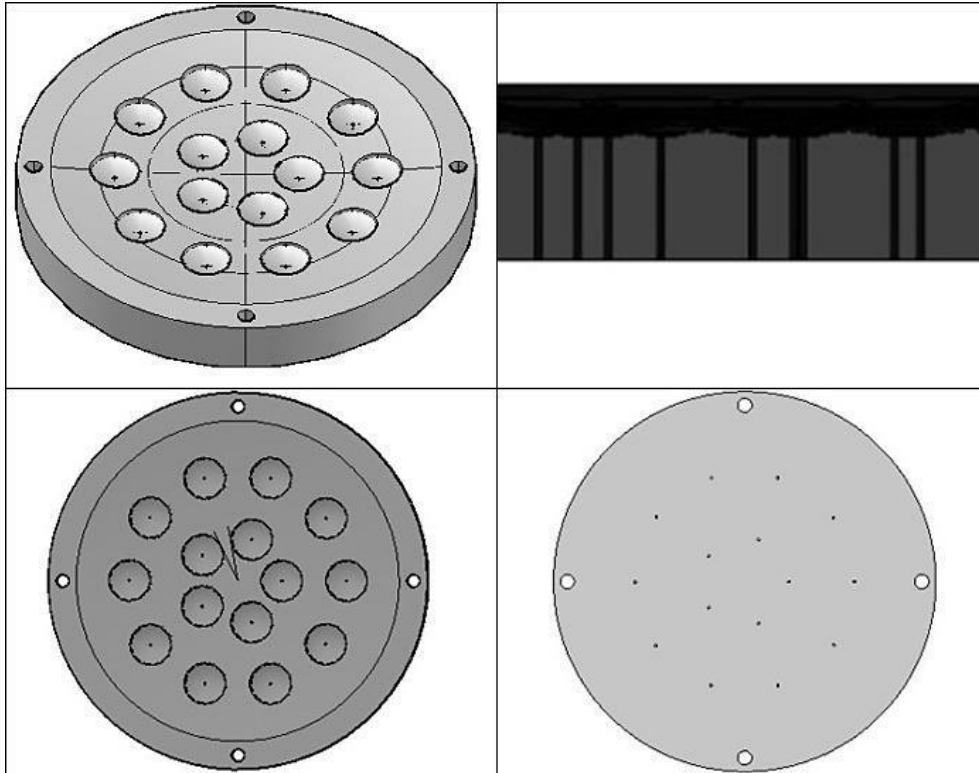
Şekil 5.7. Kireçtaşına ait XRD görüntüsü

## 5.2. Uçucu Külden Agrega Üretim Kalıbı Tasarımı

Tez kapsamında yeni bir teknik geliştirilerek, 18 mm çapında soğuk presleme yöntemiyle küp ve küre geometrisi arasında bir şekle sahip uçucu külden agregaya üretimi için kalıp tasarlanmış ve soğuk bağlama yöntemiyle uçucu külden hafif-iri agregaya üretilmiştir. Geliştirilen kalıpla hiçbir bağlayıcı ve kimyasal malzeme kullanılmadan ve ısı işlem uygulanmadan presleme yöntemiyle uçucu külden agregaya üretimi yapılmıştır.

Geliştirilmiş olan kalıba ait detaylı fotoğraflar Şekil 5.8-14'de detaylı açıklamalarla verilmiştir. Geliştirilen bu kalıp, 15 adet silindirik boşluklardan ve çubuklardan oluşmaktadır. Kalıp son derece yüksek dayanımlara sahiptir.

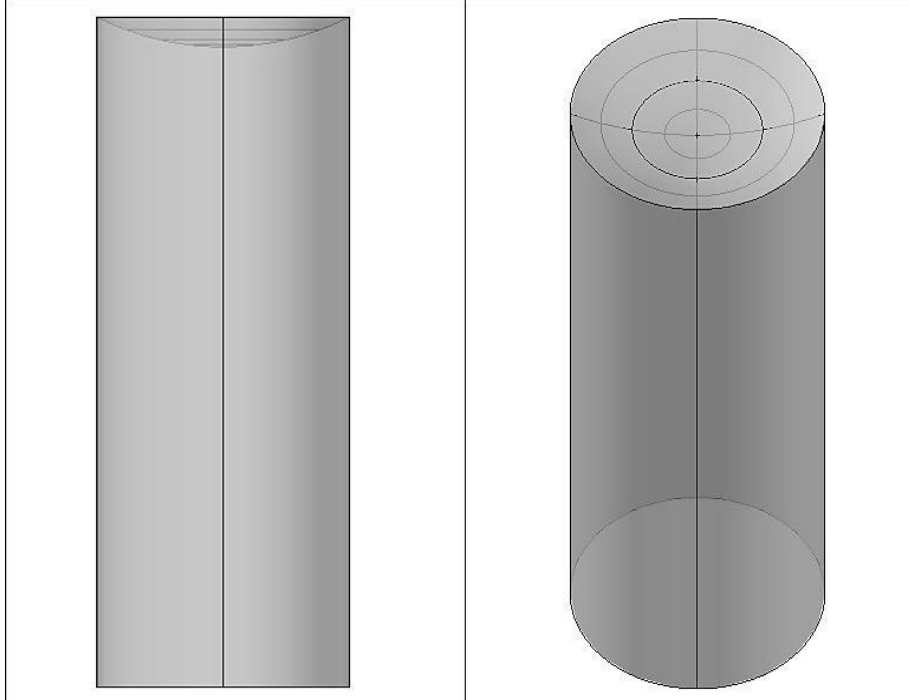
- İstenilen boyutlarda agregalar üretebilmek için kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kalıp üç parçadan oluşmaktadır. Alt plaka, üst plaka ve yük bindirme çubukları olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır (Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10).
- Preslenmiş olan agregayı kalıptan çıkarmak için çelik halka tasarlanmıştır (Şekil 5.11).
- Tasarımı yapılan kalıp ile üretilecek olan agregaların işlenebilirliği kolay ve dayanımı yüksek bir beton üretebilmesi için küp ile küre arasında bir geometriye sahip olmasına dikkat edilerek kalıp tasarımı yapılmıştır (Şekil 5.12).
- Kalıp tasarımı sırasında karışım suyunun presleme esnasında rahat drene olabilmesi amacıyla kalıbın alt plakasına dren delikleri açılmıştır (Şekil 5.13, Şekil 5.14).



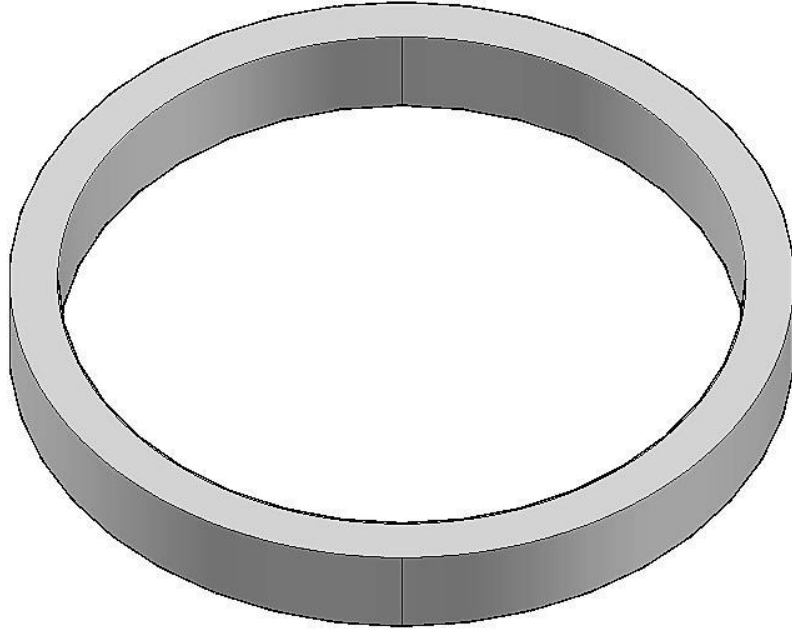
Şekil 5.8. Cihazın alt plakasının farklı açılardan görünümü



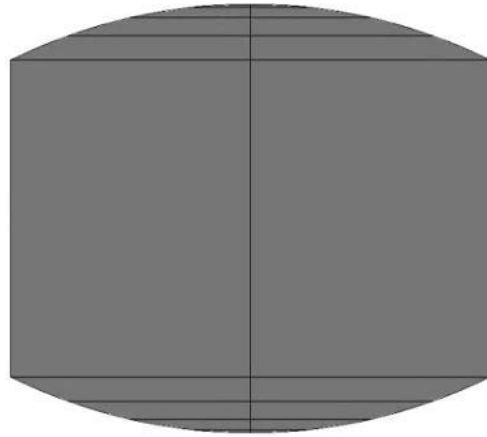
Şekil 5.9. Cihazın üst plakasının farklı açılardan görünümü



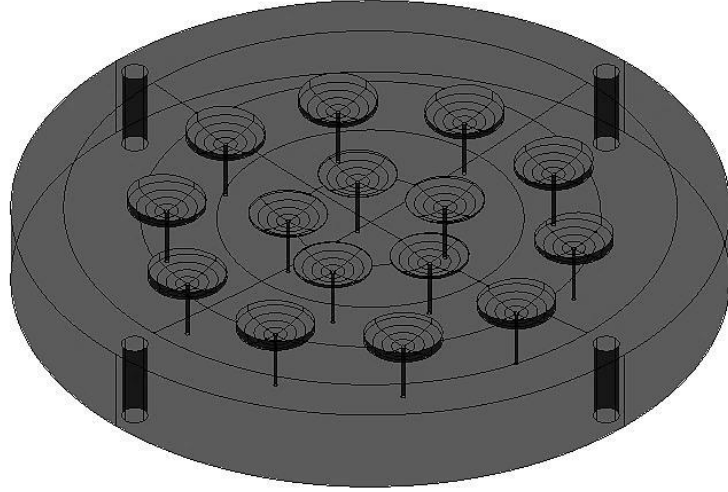
Şekil 5.10. Presleme işleminde kullanılan yük bindirme çubuğu (Kalıp için bu çubuktan 15 adet vardır)



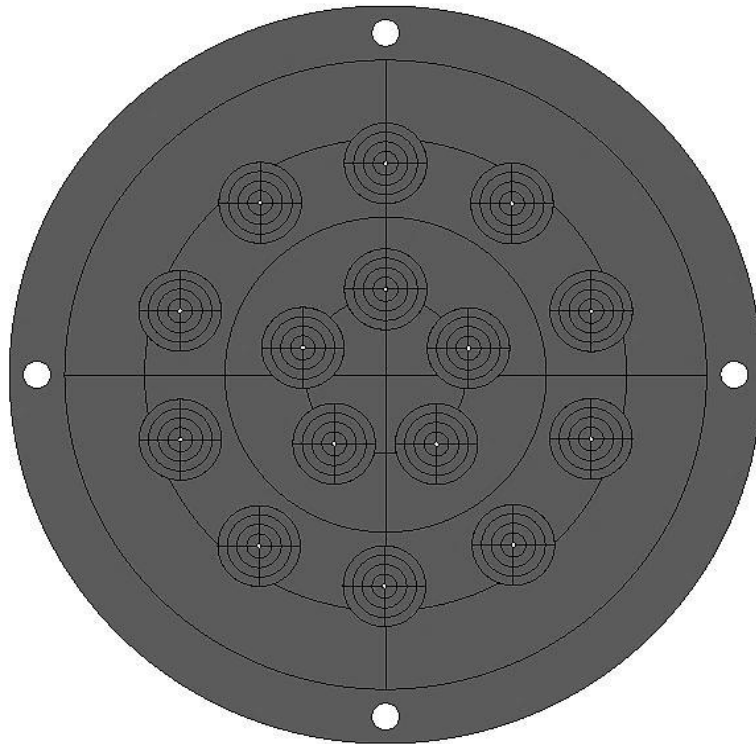
Şekil 5.11. Preslenmiş agregayı kalıptan çıkarmak için kullanılan çelik halka



Şekil 5.12. Soğuk presleme sonrası cihazdan çıkan agreganın küp ve küre arası görünümü



Şekil 5.13. Alt plakada bulunan dren delikleri ve vida delikleri (En dışta bulunan 4 adet delik)



Şekil 5.14. Alt plakanın üstten görünüşü

### 5.3. Uçucu Külden Agrega Üretimi

18 mm çapında soğuk presleme yöntemiyle küre şeklinde, uçucu külden agreganın üretimi sağlayan yeni cihazla hiçbir hidrolik bağlayıcı kullanılmadan ve ısı işleme tabi tutulmadan sadece presleme işlemi kullanılarak soğuk bağlama (soğuk peletleme) yöntemi ile 19 mm boyunda uçucu külden hafif-iri agreganın üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretilmiş agregalar başta uçucu kül olmak üzere, Portland çimentosu ve sudan oluşan homojen karışımla üretilmiştir. Üretilen agregaların beton içerisinde kullanılabilirliği ve çeşitli yaşlandırma deneyleriyle dayanımı araştırılmıştır. Bu karışımın kalıplara konularak presleme aşaması Şekil 5.15-20'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

- a) Uçucu kül, bağlayıcı malzeme (çimento) ve su kullanılarak bir karışım oluşturulur. Alt plaka ve üst plaka vidaları yardımı ile sabitlenerek bu iki parça bir bütün olmaktadır. Bu karışım kalıbın agreganın haznelere eşit miktarlarda yerleştirilmiştir (Şekil 5.15).
- b) Uçucu kül karışımı agreganın haznelere eklendikten sonra yük bindirme çubukları kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 5.16).
- c) Uçucu kül karışımını soğuk bağlama yönteminde soğuk presleme yapılması için kalıp presleme makinasında preslenmiştir (Şekil 5.17).
- d) Uçucu külden agreganın oluşturmak için oluşturulan karışım presleme işleminden sonra plakalardan çıkarılmıştır. Çıkarma işlemi sırasında da nemli agregalara presleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için cihazın vidaları sökülmüş ve alt plaka çıkarılmıştır (Şekil 5.18).
- e) Üst plakadan agregaları çıkarmak için içi boş bir silindirik halka kullanılarak tekrar presleme işlemi yapılmıştır (Şekil 5.19).
- f) Bu işlemler sonucunda belirlenen boyutlarda uçucu külden agregalar elde edilmiştir (Şekil 5.20).



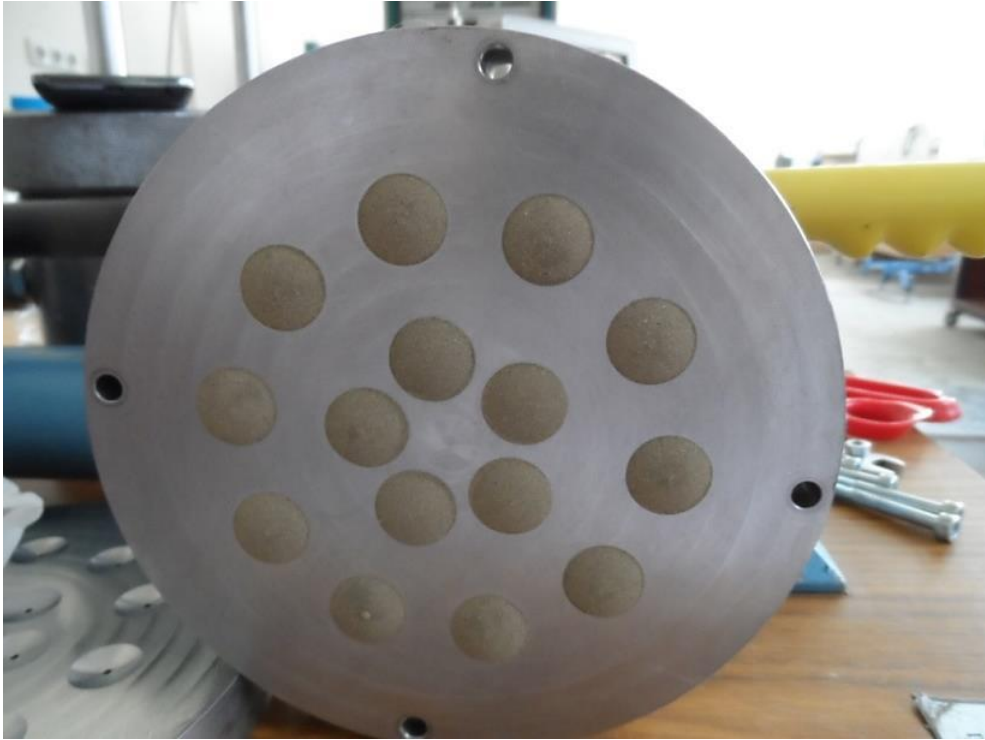
Şekil 5.15. Uçucu kül karışımının kalıbın agrega haznesine eklenmesi



Şekil 5.16. Kalıba yük bindirme çubuklarının yerleştirilmesi



Şekil 5.17. Soğuk presleme işlemi



Şekil 5.18. Presleme sonrası alt plakanın sökülmesi





Şekil 5.19. Presleme ile agregaların üst plakadan çıkarılışı



Şekil 5.20. Kalıptan çıkarılmış uçucu külden üretilen 18 mm çapa sahip agregalar

### 5.3.1. Uçucu Kül Agregalarının Kür İşlemleri

Cihazdan çıkarılan agregalar nemli oldukları için 48 saat havada kurumaya bırakılmıştır. Nemini kaybeden agregaların dayanımları artmaya başlamıştır. Kurumaya bırakılan agregalar 48 saatin sonunda  $22^{\circ}\text{C}(\pm 3)$  sıcaklıktaki suda kür edilmiştir (Şekil 5.21). Suda kür edilen örnekler daha sonra tekrar 24 saat laboratuvar ortamında ( $21^{\circ}\text{C}$ 'de) havada kurutulmuştur. Kür süresince uçucu kül agregalarında herhangi bir şişme, dağılma veya çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Uçucu kül agregalarının dayanımlarında kür süresi boyunca artmıştır.



Şekil 5.21. Kürlenmiş agrega taneleri

### 5.3.2. Uçucu Kül Agregasının Fiziko-Mekanik Özellikleri

Uçucu kül agregalarının örneğinin kuru yoğunluk ( $\rho_{dry}$ ), doymun yoğunluk ( $\rho_{sat}$ ), gözeneklilik ( $n$ ) ve ağırlıkça su emme ( $A_s$ ) gibi fiziksel özelliklerinin değerlerinin belirlenebilmesi için civa taşıma yöntemi uygulanmıştır. Yapılan tüm bu değerlendirmeler ISRM [112]'de önerilen yöntemler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Uçucu kül agregasından 16 adet örnek için yapılan hesaplamalarda örnekler saf su içine konularak 24 saat bekletilmiş ve 24 saat sonunda ıslak ağırlıkları ( $M_w$ )  $\pm 0,01$  g hassasiyetindeki teraziyle tartılmıştır. Daha sonra örnekler  $105^\circ\text{C}$ 'de 24 saat etüv fırınında kurutulmuş, kuru ağırlıkları  $\pm 0,01$  g hassas terazide belirlenmiştir. Kuru örnekler ( $M_d$ ) uygulanan civa taşıma yöntemiyle belirlenen taşan civa ağırlıklarının, civa yoğunluğuna ( $13,6 \text{ g/cm}^3$ ) bölünerek hacmi ( $V$ )  $\text{cm}^3$  cinsinden hesaplanmıştır. Hacmin belirlenmesiyle aşağıdaki eşitlikler yardımıyla kuru yoğunluk (Eş. 5.2), doymun yoğunluk (Eş. 5.3), gözeneklilik (Eş. 5.4) ve ağırlıkça su emme değerleri (Eş. 5.5) tayin edilmiş ve deney sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

$$\text{Kuru yoğunluk (g/cm}^3\text{)}, \quad \rho_{dry} = \frac{M_d}{V} \dots\dots\dots(\text{Eş. 5.2})$$

$$\text{Doymun yoğunluk (g/cm}^3\text{)}, \quad \rho_{sat} = \frac{M_w}{V} \dots\dots\dots(\text{Eş. 5.3})$$

$$\text{Gözeneklilik (n)}, \quad n = \frac{M_w - M_d}{V} * 100 \dots\dots\dots(\text{Eş. 5.4})$$

$$\text{Ağırlıkça su emme (A}_s\text{)}, \quad A_s = \frac{M_w - M_d}{M_d} * 100 \dots\dots(\text{Eş. 5.5})$$

Çizelge 5.6. Uçucu kül agregasının kuru-doygun yoğunluk, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları

Fiziksel özellik	$\bar{X}$	$\sigma$	N
$\rho_{dry}$	1,83	0,06	16
$\rho_{sat}$	2,03	0,06	16
n	19,92	1,92	16
As	10,92	1,15	16

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı,  $\rho_{sat}$ : doymuş yoğunluk ( $g/cm^3$ )  
 $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ ), n: gözeneklilik (%), As: ağırlıkça su emme (%)

### 5.3.3. Uçucu Kül Agregasının Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi

Nokta yüğü dayanım indeksi deneyi, kayaç gruplarının tek eksenli sıkışma dayanımını tahmin etmek için uygulanmıştır. Uçucu külden üretilmiş agregalardan alınan 12 adet örnek üzerinde agrega örneği, konik başlıklarının arasına yerleştirilmiş ve eksene dik yönde yükleme ile gerçekleştirilen çapsal deney metodu uygulanmıştır. ISRM [112]'ye göre yapılan deneyin sonucunda bulunan ortalama nokta yük dayanım indeksi değeri 50 mm çaptaki karot örneklerine göre standart hale getirilerek  $I_{s(50)}$  değerleri saptanmıştır.

Hesaplamalar için düzeltilmemiş nokta-yük indeksi ( $I_s$ )

$I_s = P/D_e^2$  eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;  $D_e$  eş değer karot çapı olup,

Çapsal deneyde:  $D_e^2 = D^2$

Hesaplamalarda,  $I_s$  değeri boyut düzeltmesinde, çapsal deneyde uygulanan D'nin değeri, eksenel, blok ve düzensiz örneklerde uygulanan diğer deney türlerindeki  $D_e$ 'nin fonksiyonu olarak değişir. Buna bağlı olarak  $I_s$  değeri eşdeğer karot çapına ( $D=50$  mm) göre düzeltilmiştir. Bu amaçla düzeltilmiş nokta yüğü dayanım indeksi;

Boyut düzeltme faktörü (F);

$F = (D_e/50)^{0.45}$  formülünden hesaplanmıştır.

$I_{s(50)} = F \cdot I_s$  eşitliğinden hesaplanmış ve değerleri Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Uçucu kül agregasının nokta yükü dayanım indeksi deneyine ait sonuçlar

Mekanik özellik	$\bar{X}$	$\sigma$	N
$I_s$	2,5	1,01	12
$I_{s(50)}$	5,9	2,35	12

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı

#### 5.3.4. Kireçtaşı Agregasının Fiziko-Mekanik Özellikleri

Betonda kullanılacak olan kireçtaşı agregasının hacim (V), kuru yoğunluk ( $\rho_{dry}$ ), doymun yoğunluk ( $\rho_{sat}$ ), gözeneklilik (n) ve ağırlıkça su emme ( $A_s$ ) gibi fiziksel özelliklerinin değerlerinin belirlenebilmesi için düzensiz şekilli geometriye sahip ufak el örneklerinde kullanılan civa taşıma yöntemi uygulanmıştır. Yapılan tüm bu değerlendirmeler ISRM [112]'de önerilen yöntemler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Kireçtaşı agregasından 8 adet örnek için yapılan hesaplamalarda örnekler saf su içine konularak 24 saat bekletilmiş ve 24 saat sonunda ıslak ağırlıkları ( $M_w$ )  $\pm 0,01$  g hassasiyetindeki teraziyle tartılmıştır. Daha sonra örnekler  $105^\circ\text{C}$ 'de 24 saat etüv fırınında kurutulmuş ve kütlesi gram cinsinden  $\pm 0,01$  g hassas terazide belirlenmiştir. Kuru örneklere ( $M_d$ ) uygulanan civa taşıma yöntemiyle belirlenen taşan civa ağırlıklarının, civa yoğunluğuna ( $13,6 \text{ g/cm}^3$ ) bölünerek hacmi (V)  $\text{cm}^3$  cinsinden hesaplanmıştır. Hacmin belirlenmesiyle aşağıdaki eşitlikler yardımıyla kuru yoğunluk, doymun yoğunluk, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerleri tayin edilmiş ve deney sonuçları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kireçtaşı agregasının kuru-doygun yoğunluk, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları

<b>Fiziksel özellik</b>	<b><math>\bar{X}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
$\rho_{dry}$	2,69	0,04	8
$\rho_{sat}$	2,70	0,04	8
n	0,30	0,46	8
As	0,11	0,17	8

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk( $g/cm^3$ ),  $\rho_{sat}$ : doymuş yoğunluk ( $g/cm^3$ ), n: gözeneklilik (%), As: ağırlıkça su emme (%)

### 5.3.5. Kireçtaşı Agregasının Nokta Yüğü Dayanım İndeksi Deneyi

Bu deney için izlenen metot olarak toplam 15 adet kireçtaşı agregasından alınmış örneklere konik başlıkların arasına yerleştirilmiş olup, blok ve düzensiz şekillerde örneklere uygulanan metot kullanılmıştır. ISRM [112]'ye göre uygulanan deney sonucundan bulunan nokta yüğü dayanım indeksi değerleri 50 mm çaptaki karot örneklerine göre standart hale getirilerek  $I_{s(50)}$  değerleri saptanmıştır. Hesaplamalar için düzeltilmemiş nokta-yüğü indeksi ( $I_s$ );

$I_s = P/D_e^2$  eşitliğinden hesaplanmıştır.

Burada;  $D_e$  eş değer karot çapı olup,

Düzensiz şekilli örneklerde:  $D_e^2 = 4A/\pi$

Buradaki A değeri:  $A = W.D$  (Konik başlıkların temas noktalarından geçen örneklerin en küçük kesit alanı)

Hesaplamalarda,  $I_s$  değeri boyut düzeltmesinde, düzensiz şekilli örneklerde deneyde uygulanan  $D$ 'nin değeri, aksenal ve çapsal örneklerde uygulanan diğer deney türlerindeki  $D_e$ 'nin fonksiyonu olarak değişir. Buna bağlı olarak  $I_s$  değeri eşdeğer karot çapına ( $D=50$  mm) göre düzeltilmiştir. Bu amaçla düzeltilmiş nokta yükü dayanım indeksi;

$I_{s(50)} = F \cdot I_s$  eşitliğinden hesaplanmıştır.

Boyut düzeltme faktörü ( $F$ );

$F = (D_e/50)^{0.45}$  formülünden hesaplanmış ve değerleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Kireçtaşı agregasının nokta yükü dayanım indeksi deneyine ait sonuçlar

<b>Mekanik özellik</b>	<b><math>\bar{X}</math></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
$I_s$	2,3	0,83	15
$I_{s(50)}$	5,7	2,01	15

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı

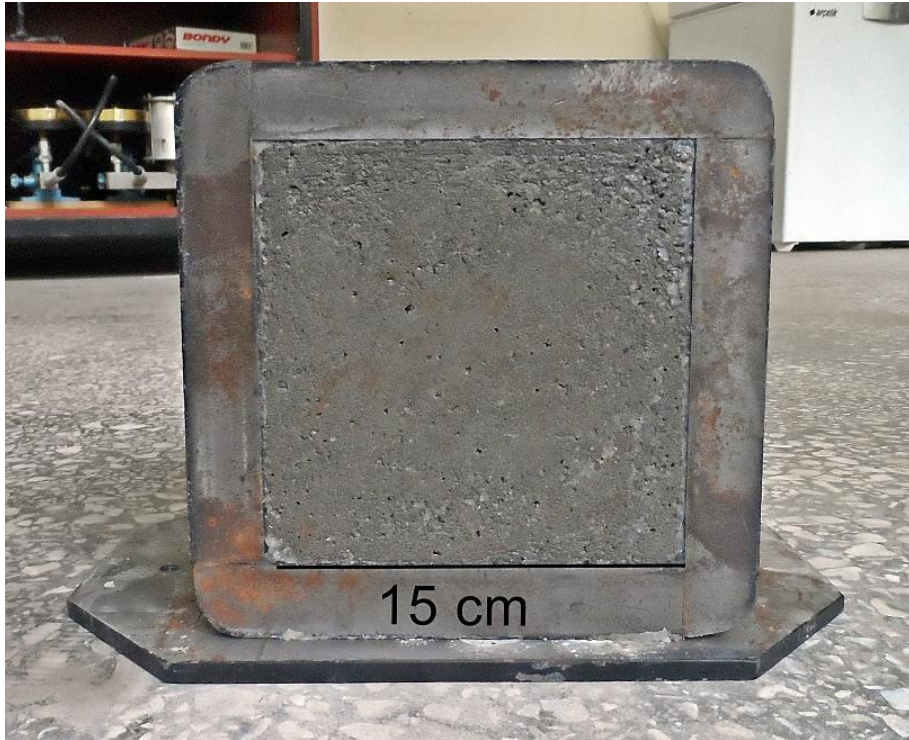
## 6. BETON ÜRETİMİ, NUMUNELERİN YERİNE KONMASI VE BAKIMI

Çalışma boyunca; 150x150x150 mm ölçülerinde küp şeklindeki harç numuneler kullanılmıştır. Bütün malzemeler hassas terazide ayrı ayrı tartılmış olup kırma taş haline getirilen ve elek analizleri yapılan numuneler beton dökümlerinde kullanılmak üzere karışım haline getirilerek hazırlanmıştır. İstenilen niteliklerde beton elde edebilmek için karışımdaki agregaların uygun granülometriye sahip olmaları önemlidir. Toplam 24 adet beton numunesi üretilmiş ve karışıma girecek su, çimento, uçucu kül agregası ve kireçtaşı agregası miktarları önceden hesaplanmıştır. İlk olarak çimentoya suyun yarısı eklenerek karıştırılmıştır. Daha sonra kireçtaşı ve uçucu kül agregaları sırayla karışıma eklenerek 4 dakika boyunca yatay eksenli mikserle karıştırılmıştır. Geriye kalan suyun tamamı harca eklenerek karışım yeterli kıvama gelene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Akabinde numuneler önceden vazelinlenmiş olan küp kalıplara kademeli olarak yerleştirilmiştir. Her bir kısım kalıba yerleştirildikten sonra vibrasyon ve perdahlama işlemi uygulanarak betonun iyi bir şekilde yerleşmesi sağlanmıştır. Betonun yerine yerleştirilmesinin devamında mala ile üst yüzeyleri düzeltilmiştir (Şekil 6.1). Beton numuneler laboratuvar ortamında açık yüzeyleri ıslak bez ile kapatılarak 24 saat bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler, kalıplar söküldükten sonra (Şekil 6.2 ve Şekil 6.3), 22°C(±3) sıcaklıktaki kür havuzuna konulmuştur. Her grubun numuneleri 28 gün kürde kaldıktan sonra çıkarılarak ıslak ağırlıkları ve 24 saat 60°C'de etüv fırınında bekletilerek kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Kür süresi ve çevrim süresi numunelere uygulanacak yaşlandırma deneyleri dikkate alınarak tek seferde değil, daha önceden belirlenen zamanlarda döküm yapılmıştır.

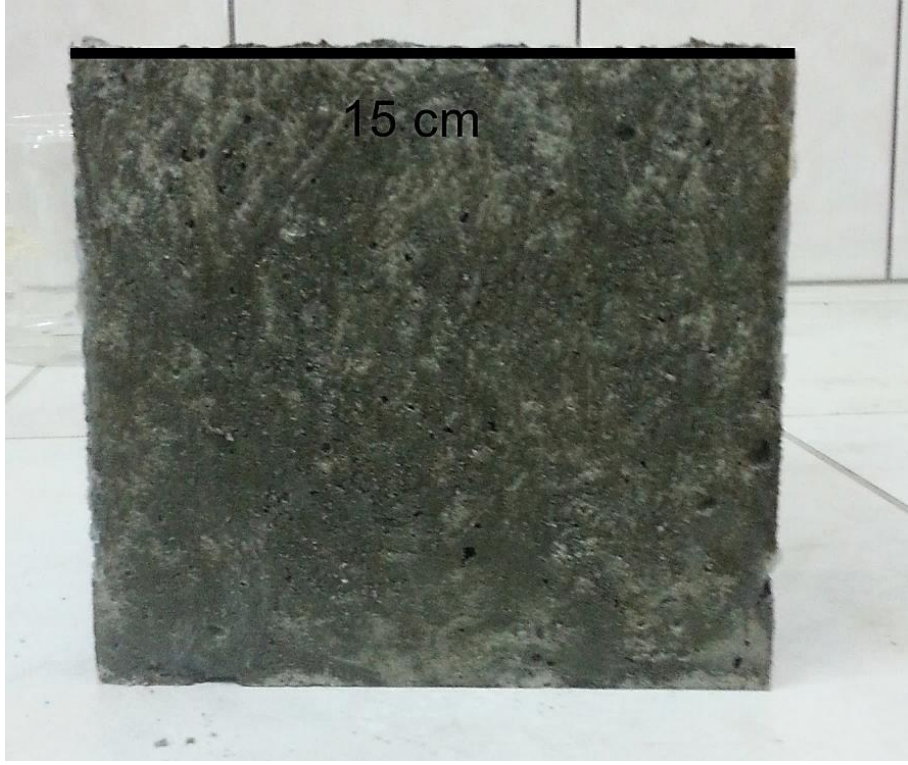




Şekil 6.1. Karışımın beton kalıba dökülmesi



Şekil 6.2. Beton numunenin kalıpta görünümü (alt yüzey)



Şekil 6.3. Kalıptan çıkarılan beton numune

## 6.1. Beton Numunesi Hazırlama

### 6.1.1. Taze Beton

Hazırlanan 3 adet uçucu kül agregasından ve 3 adet kireçtaşı agregasından üretilmiş beton numuneleri kalıplardan çıkarılarak  $22^{\circ}\text{C}(\pm 3)$  sıcaklıktaki suda 28 gün boyunca kür edilmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin deney başlamadan önce ıslak ağırlıkları ve daha sonra 24 saat etüv fırınında  $60^{\circ}\text{C}$ 'de bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin ıslak ve kuru ağırlıkları  $\pm 0,01$  g hasiyette tartım yapabilen terazi ile tartılmıştır. Tartılan taze örneklerin daha sonra dijital kumpasla boy ölçümleri ve ultra ses geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır. Bu örneklere hiçbir şekilde yaşlandırma deneyi yapılmamıştır. Örneklere daha sonra tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi yapılmıştır. Taze beton dökümündeki amaç yaşlandırma deneylerine (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam) maruz kalmış kireçtaşı agregası ve uçucu kül agregası içeren beton örneklerin başlangıç çevrimlerindeki dayanım değerlerinin belirlenmesi ve kullanılmasıdır.

## 6.2. Yaşlandırma Deneyleri

### 6.2.1. Donma-Çözülme Deneyi

Hazırlanan 6 adet uçucu kül agregasından üretilmiş beton numunesi kalıplardan çıkarılarak  $22^{\circ}\text{C}(\pm 3)$  sıcaklıktaki suda 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin deney başlamadan önce ıslak ağırlıkları ve daha sonra 24 saat etüv fırınında  $60^{\circ}\text{C}$ 'de bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin ıslak ve kuru ağırlıkları  $\pm 0,01$  g hasiyette tartım yapabilen terazi ile tartılmıştır. Böylece deney numuneleri donma-çözülme deneyine hazır hale gelmişlerdir. Donma-çözülme deneyine başlanılmadan önce ultra ses geçiş hızı deneyi ve dijital kumpasla boy ölçümleri yapılmıştır.

Donma-çözülme olayının, üretilen blokların fiziko-mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için, Hacettepe Üniversitesi Kaya Mekaniği Laboratuvarında bulunan derin dondurucu kullanılmıştır.

Altı adet  $150 \times 150 \times 150$  mm'lik beton küp numunelere ASTM C 666 ölçütlerine uygun şekilde donma-çözülme deneyi uygulanmıştır. Suyu doygun haldeki deney numuneleri  $-18^{\circ}\text{C}(\pm 3)$ 'ye getirilmiş olan derin dondurucu içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 6.4). Numunelerin tüm yüzeylerinin soğuk hava ile teması eşit olabilecek şekilde yerleştirilen numuneler 16 saat derin dondurucuda bekletildikten sonra,  $20^{\circ}\text{C}(\pm 5)$  oda sıcaklığında 8 saat çözülmeye bırakılmıştır. Numunelerin 16 saat derin dondurucuda, 8 saat oda sıcaklığında kalmalarıyla 1 çevrim tamamlanmış olmaktadır. Bu işlemler beton numunelerinden üç tanesi için 22 çevrim ve diğer üç tanesi için 44 çevrim olarak belirlenmiştir. Çevrim sayıları tamamlanan beton numunelerin 24 saat suda bekletildikten sonra ıslak ağırlıkları ve 24 saat etüvde bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Çevrim sonunda ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır.



Şekil 6.4. Donma-çözülme deneyine maruz bırakılmış beton numuneler

### 6.2.2. Islanma-Kuruma Deneyi

Hazırlanan 6 adet uçucu kül agregasından üretilmiş beton numuneler kalıplardan çıkarılarak  $22^{\circ}\text{C}(\pm 3)$  sıcaklıktaki suda 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin deney başlamadan önce ıslak ağırlıkları ve daha sonra 24 saat etüv fırınında  $60^{\circ}\text{C}$ 'de bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin ıslak ve kuru ağırlıkları  $\pm 0,01$  g hasiyette tartım yapabilen terazi ile tartılmıştır. Böylece deney numuneleri ıslanma-kuruma deneyine hazır hale gelmişlerdir. Islanma-kuruma deneyine başlanılmadan önce ultra ses geçiş hızı deneyi yapılmış ve dijital kumpasla boy ölçümleri yapılmıştır.

Islanma-kuruma olayının, üretilen beton bloklardaki fiziko-mekanik özelliklerindeki etkilerini araştırmak için, Hacettepe Üniversitesi Kaya Mekaniği Laboratuvarında bulunan etüv fırını kullanılmıştır.

Altı adet  $150 \times 150 \times 150$  mm'lik küp numuneler üzerinde ıslanma-kuruma deneyi gerçekleştirilmiştir. Suyu doymun haldeki deney numuneleri  $60^{\circ}\text{C}(\pm 5)$ 'ye getirilmiş

olan etüv fırını içerisine yerleştirilmiştir (şekil 6.5). Numuneler, tüm yüzeyleri fırın içerisinde sıcak hava ile teması eşit olabilecek şekilde yerleştirilerek 6 saat bekletilmiş, 6 saatin sonunda fırından çıkarılan beton numuneler sonrasında 22°C(±3) sıcaklığındaki kr havuzuna konularak 18 saat bekletilmiştir (şekil 6.6). Numunelerin 6 saat etüv fırınında, 18 saat kür havuzunda kalmalarıyla 1 çevrim tamamlanmış olmaktadır. Bu işlemler  adet beton numunesi için 40 çevrim ve kalan  adet beton numunesi için 80 çevrim olarak belirlenmiştir. evrim sayıları tamamlanan beton numunelerin 24 saat suda bekletildikten sonra ıslak ağırlıkları ve 24 saat etüvde bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. evrim sonunda ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri yapılmıştır.



şekil 6.5. Islanma-kuruma deneyine ait beton numunelerin etüv fırınındaki görüntüsü



Şekil 6.6. Islanma-kuruma deneyine ait beton numunelerin kür havuzundaki görünümü

### 6.2.3. Dış Ortam Deneyi

Hazırlanan 3 adet uçucu kül agregasından ve 3 adet kireçtaşı agregasından üretilmiş beton numuneleri kalıplardan çıkarılarak  $22^{\circ}\text{C}(\pm 3)$  sıcaklıktaki suda 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numunelerin deney başlamadan önce ıslak ağırlıkları ve daha sonra 24 saat etüv fırınında  $60^{\circ}\text{C}$ 'de bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Numunelerin ıslak ve kuru ağırlıkları  $\pm 0,01$  g hasiyette tartım yapabilen terazi ile tartılmıştır. Tartılan beton numunelerin daha sonra dijital kumpasla boy ölçümleri ve ultra ses geçiş hızı ölçümleri yapılmıştır.

Deney programında beton örnekler 270 çevrim (gün) boyunca atmosferik (nem, toz vb.), meteorolojik ve mevsimsel değişiklikler gibi farklı koşullara maruz

bırakılmıştır (Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10). Deney süresi sonunda beton numuneler 24 saat boyunca kür havuzunda bekletilip ıslak ağırlıkları belirlenmiş ve daha sonra 24 saat etüv fırınında 60°C'de bekletildikten sonra kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Ağırlıkları  $\pm 0,01$  g tartım yapabilen hassas terazi ile ölçülmüştür. Örneklere ardından ultra ses geçiş hızı ve tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi uygulanmıştır.



Şekil 6.7. Dış ortam deneyine maruz bırakılmış beton numuneler (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe)



Şekil 6.8. Dış ortam deneyine maruz bırakılmış beton numunelerin genel görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe)



Şekil 6.9. Dış ortam deneyindeki numunelerin kar altındaki görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe)





Şekil 6.10. Dış ortamdaki beton numunelerin yakın plan görünümü (Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü orta bahçe)

### 6.3. Betonların Fiziko-Mekanik Özellikleri

Üretilen betonlarda; yoğunluk, ağırlıkça su emme ve gözeneklilik gibi fiziko-mekanik özelliklerin belirlenmesi, beton numunelerin ıslak ağırlıkları ile etüv fırınından çıkarıldıktan sonraki kuru ağırlıkları arasındaki fark ile belirlenir. Sertleşmiş beton numunelerine ait yoğunluk, ağırlıkça su emme ve gözeneklilik değerleri çeşitli ASTM standartlarına göre yapılmıştır.

#### 6.3.1. Betonlarda Yoğunluk Değerlerinin Hesaplanması

Beton numunelerin yoğunluk değerleri ASTM C 138M-17 standardına göre belirlenmiştir. Üretilen betonlar kalıptan çıkarıldıktan sonra kür havuzuna konulmuştur. Numuneler 28 gün kürde kaldıktan sonra çıkarılarak ıslak ağırlıkları belirlendikten sonra 24 saat etüv fırınında bekletilerek kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numuneler çeşitli yaşlandırma deneylerinin çevrimleri sonunda tekrar kür havuzunda 24 saat bekletildikten sonra deney sonrası ıslak ağırlıkları ve 24 saat

etüvde bekletilerek deney sonrası kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Tüm beton numunelerin deney öncesi üç boyutta ölçümleri yapılarak hacimleri (V) cm<sup>3</sup> cinsinden belirlenmiştir. Beton numunelere ait deney öncesi/sonrası ıslak ağırlıkları (M<sub>w</sub>) ve kuru ağırlıkları (M<sub>d</sub>) belirlenmiş ve buna göre beton numunelerin doymun yoğunlukları (Eş. 6.1) ve kuru yoğunlukları (Eş. 6.2),

Doymun yoğunlukları;

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{M_w}{V} \dots\dots\dots(\text{Eş. 6.1})$$

$\rho_{\text{sat}}$ : Deney öncesi/sonrası doymun yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

M<sub>w</sub>: Deney öncesi/sonrası ıslak ağırlık (g)

V: Hacim (cm<sup>3</sup>)

Kuru yoğunlukları;

$$\rho_{\text{dry}} = \frac{M_d}{V} \dots\dots\dots(\text{Eş. 6.2})$$

$\rho_{\text{dry}}$ : Deney öncesi/sonrası kuru yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

M<sub>d</sub>: Deney öncesi/sonrası kuru ağırlık (g)

V: Hacim (cm<sup>3</sup>)

### 6.3.2. Betonların Gözeneklilik Değerlerinin Hesaplanması

Beton numunelerin gözeneklilik değerlerinin belirlenmesi ASTM C 1754M-12 standardına göre yapılmıştır. Üretilen betonlar kalıptan çıkarıldıktan sonra kür havuzuna konulmuş ve numuneler 28 günlük kür süresinin tamamladıktan sonra ıslak ağırlıkları belirlenmiş, sonrasında 24 saat etüv fırınında bekletilerek kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numuneler çeşitli yaşlandırma deneylerinin çevrimleri sonunda tekrar kür havuzunda 24 saat bekletildikten sonra deney sonrası ıslak ağırlıkları ve 24 saat etüvde bekletilerek deney sonrası kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Tüm beton numunelerin deney öncesi üç boyutta ölçümleri yapılarak hacimleri (V) cm<sup>3</sup> cinsinden belirlenmiştir. Beton numunelere ait deney öncesi/sonrası ıslak ağırlıkları (M<sub>w</sub>) ve kuru ağırlıkları (M<sub>d</sub>) belirlenmiş ve buna göre beton numunelerin gözeneklilik değerinin yüzde hesaplaması (Eş. 6.3);

$$n = \frac{M_w - M_d}{V} * 100 \dots \dots \dots (Eş. 6.3)$$

n: Gözeneklilik (%)

M<sub>w</sub>: Deney öncesi/sonrası ıslak ağırlık (g)

M<sub>d</sub>: Deney öncesi/sonrası kuru ağırlık (g)

V: Hacim (cm<sup>3</sup>)

### 6.3.3. Betonların Ağırlıkça Su Emme Değerlerinin Hesaplanması

Beton numunelerin ağırlıkça su emme değerlerinin belirlenmesi ASTM C 642-13 standardına göre yapılmıştır. Üretilen betonlar kalıptan çıkarıldıktan sonra kür havuzuna konulmuş ve numuneler 28 günlük kür süresinin tamamladıktan sonra ıslak ağırlıkları belirlenmiş, sonrasında 24 saat etüv fırınında bekletilerek kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numuneler çeşitli yaşlandırma deneylerinin çevrimleri sonunda tekrar kür havuzunda 24 saat bekletildikten sonra deney sonrası ıslak ağırlıkları ve 24 saat etüvde bekletilerek deney sonrası kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Beton numunelere ait deney öncesi/sonrası ıslak ağırlıkları

( $M_w$ ) ve kuru ağırlıkları ( $M_d$ ) belirlenmiş ve buna göre beton numunelerin ağırlıkça su emme yüzde değeri (Eş. 6.4);

$$As = \frac{M_w - M_d}{M_d} * 100 \dots \dots \dots (Eş. 6.4)$$

As: Ağırlıkça su emme (%)

$M_w$ : Deney öncesi/sonrası ıslak ağırlık (g)

$M_d$ : Deney öncesi/sonrası kuru ağırlık (g)

Yaşlandırma deneyleri (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam) uygulanmış beton numunelere ait fiziko-mekanik özellikler Çizelge 6.1, Çizelge 6.2, Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Donma-çözülme deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları

Çevrim sayısı	Fiziksel özellik	$\bar{X}$	$\sigma$	N
0	$\rho_{dry}$	2,27	0,009	6
	$\rho_{sat}$	2,29	0,010	
	n	2,36	0,191	
	As	1,04	0,082	
22	$\rho_{dry}$	2,27	0,011	3
	$\rho_{sat}$	2,28	0,013	
	n	1,30	0,210	
	As	0,57	0,091	
44	$\rho_{dry}$	2,28	0,004	3
	$\rho_{sat}$	2,29	0,004	
	n	0,87	0,090	
	As	0,38	0,039	

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ ),  $\rho_{sat}$ : doymuş yoğunluk ( $g/cm^3$ ), n: gözeneklilik (%), As: ağırlıkça su emme (%)

Çizelge 6.2. Islanma-kuruma deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları

Çevrim sayısı	Fiziksel özellik	$\bar{X}$	$\sigma$	N
0	$\rho_{dry}$	2,27	0,008	6
	$\rho_{sat}$	2,30	0,005	
	n	2,41	0,309	
	As	1,07	0,143	
40	$\rho_{dry}$	2,27	0,006	3
	$\rho_{sat}$	2,29	0,006	
	n	1,08	0,012	
	As	0,47	0,006	
80	$\rho_{dry}$	2,27	0,004	3
	$\rho_{sat}$	2,28	0,004	
	n	0,68	0,040	
	As	0,30	0,018	

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ ),  $\rho_{sat}$ : doymuş yoğunluk ( $g/cm^3$ ), n: gözeneklilik (%), As: ağırlıkça su emme (%)

Çizelge 6.3. Dış ortam deneyine ait betonların kuru-doygun yoğunlukları, gözeneklilik ve ağırlıkça su emme değerlerinin sonuçları

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Fiziksel özellik	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası katkılı beton (Dış ortam)	0	$\rho_{dry}$	2,27	0,009	3
		$\rho_{sat}$	2,29	0,012	
		n	2,77	0,973	
		As	1,22	0,433	
Kireçtaşı agregası katkılı beton (Dış ortam)	270	$\rho_{dry}$	2,26	0,005	3
		$\rho_{sat}$	2,30	0,007	
		n	1,71	0,513	
		As	0,75	0,228	
Kireçtaşı agregası katkılı beton (Dış ortam)	0	$\rho_{dry}$	2,26	0,005	3
		$\rho_{sat}$	2,29	0,015	
		n	2,63	1,252	
		As	1,16	0,551	
Kireçtaşı agregası katkılı beton (Dış ortam)	270	$\rho_{dry}$	2,26	0,016	3
		$\rho_{sat}$	2,28	0,017	
		n	2,36	0,168	
		As	1,04	0,074	

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ ),  $\rho_{sat}$ : doymuş yoğunluk ( $g/cm^3$ ), n: gözeneklilik (%), As: ağırlıkça su emme (%)

#### 6.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

##### 6.4.1. Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyi

Ultrasonik geçiş süresi ölçümleri ASTM C 597 "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", standartında belirtilen kriterlere uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Ultrasonik geçiş hızı metodu, beton içerisinden geçen dalganın geçiş hızı ölçülmektedir. Hızın hareket zamanı elektronik olarak ölçülmektedir. Ölçülen bu hız numune ile ilgili bazı özelliklerin tahmininde kullanılır. Üretilen beton numunelerin ultrasonik hızlarını belirlemek için laboratuvarındaki mevcut dijital ultrasonik test cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.11). Probların temas ettikleri yüzeylerin

temiz, düzgün ve boşluksuz olmaları ve probların beton yüzeyi arasında boşluk kalmayacak şekilde ultrason jeli vb. malzeme kullanılması gerekir. Blok numunelerin karşılıklı iki yan yüzeylerinden yapılan ölçümler ses geçiş süresini  $\mu\text{s}$  cinsinden ölçmektedir

Ölçülen ultrasonik geçiş süresinin yüksek olması malzemenin iç yapısındaki boşluk miktarının az olduğunu göstermektedir. Bu metot ile numunenin iç yapısı hakkında bilgi edinilmiş olunur. Ultrasonik geçiş süresinden, ultrasonik geçiş hızı (Eş. 6.5);

(V): Hız (m/s)

(L): Boy (mm)

(T): Zaman ( $\mu\text{s}$ )

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(\text{Eş. 6.5})$$

Ultrasonik geçiş süresi tespiti yapılırken ölçüm yapan problar bir bez ile temizlenmiştir. Diğer taraftan okumaların daha sağlıklı olabilmesi için aletin başlıklarına ultrason jeli sürülmüş ve tüm beton numuneler için deney öncesi ve sonrası değerleri belirlenmiştir.



Şekil 6.11. Pundit Test marka ultrasonik test aletine ait görüntü

Yaşlandırma deneylerini (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam) uygulanmış beton numunelere ait  $P_{dalga}$  hızı değerleri Çizelge 6.4, Çizelge 6.5, Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.4. Donma-çözülme deneyine ait  $P_{dalga}$  hızı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası	0	$P_{dalga}$ hızı (m/s)	4622,3	33,62	6
katkılı beton	22		4672,4	65,42	3
(donma-çözülme deneyi)	44		4677,5	9,90	3

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı

Çizelge 6.5. Islanma-kuruma deneyine ait  $P_{dalga}$  hızı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası	0	$P_{dalga}$ hızı (m/s)	4588,0	45,57	6
katkılı beton	40		4742,9	32,75	3
(ıslanma-kuruma deneyi)	80		4735,3	32,73	3

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı

Çizelge 6.6. Dış ortam deneyine ait  $P_{dalga}$  hızı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası katkı	0	$P_{dalga}$ hızı (m/s)	4640,2	13,24	3
beton (Dış ortam)	270		4727,6	24,15	
Kireçtaşı agregası katkı	0		4632,0	29,37	3
beton (Dış ortam)	270		4709,1	17,10	

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı



#### 6.4.2. Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı

Beton numunelere uygulanan tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi ASTM C 39 standardına göre yapılmıştır. Deneyin uygulanması, beton numunelerin presleme cihazında kırılıncaya kadar yüklenmesiyle numunenin taşıyabildiği en büyük yükün belirlenmesi ve betonun tek eksenli sıkışma dayanımı hesaplanması ilkesine dayanmaktadır.

Hazırlanan tüm beton numunelerin deney süresi sonunda basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Presleme cihazının yükleme başlıkları yüzey kısımları silinerek temizlenir ve numunenin başlıklarla temas ettiği yüzeylerinde bulunan herhangi bir çıkıntı, kalıntı veya tane varsa alınır.

Küp numunelere uygulanan yükün yönü, dökümü yapılan betonun yönüne dik olacak şekilde ve temiz yüzeylerin yükleme başlıklarına denk gelmesine dikkat edilerek makinenin alt yükleme başlığının üzerine merkezlenerek yerleştirilmiştir. Numune boyutları ve yükleme hızı makinede ayarlandıktan sonra makine çalıştırılarak numuneler en büyük yükleme değerine ulaşıncaya kadar sabit hızda uygulanmış ve numune kırılmıştır (Şekil 6.12).

Yükleme hızı bütün beton numunelerde 0,6 kN/s olarak seçilmiştir. Numune kırılma yükü değerleri N olarak belirlenmiş (P) ve basınç dayanımı değerleri  $N/mm^2$  olarak eşitliği yardımıyla hesaplanmıştır (Eş. 6.6).

$$UCS = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (Eş. 6.6)$$

UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı, MPa

P: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N

A: Beton numunenin üzerine uygulanan basınç yükünün kesit alanı,  $mm^2$



Şekil 6.12. 3000 kN dayanımlı hidrolik presleme cihazı

Yaşlandırma deneyleri (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam) uygulanmış beton numunelere ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri Çizelge 6.7, Çizelge 6.8, Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.7. Donma-çözülme deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası	0	UCS (MPa)	53,62	0,90	6
katkılı beton (donma-çözülme deneyi)	22		47,00	1,34	3
	44		54,52	2,24	3

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı

Çizelge 6.8. Islanma-kuruma deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası	0	UCS (MPa)	53,62	0,90	6
katkılı beton (ıslanma-kuruma deneyi)	40		58,86	3,13	3
	80		56,55	0,23	3

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı

Çizelge 6.9. Dış ortam deneyine ait tek eksenli sıkışma dayanımı değerleri

Beton türü ve yaşlandırma deneyi	Çevrim sayısı	Deney türü	$\bar{X}$	$\sigma$	N
Uçucu kül agregası katkıli beton (dış ortam)	0	UCS (MPa)	53,62	0,90	3
	270		56,80	4,00	
Kireçtaşı agregası katkıli beton (dış ortam)	0		44,22	2,56	3
	270		59,49	3,00	

$\bar{X}$ : ortalama,  $\sigma$ : standart sapma, N: örnek sayısı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı

#### 6.4.2.1. Betonların sınıflandırılması

TS-EN 206-1 standartlarına göre betonun, basınç dayanımına göre sınıflandırılması, normal ve ağır betonlar için Çizelge 6.10'da verilen sınıflamalar uygulanmaktadır. Sınıflandırmada, çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindir şeklindeki numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (silindir) veya kenar uzunluğu 150 mm olan küp şeklindeki numunenin 28 günlük karakteristik basınç dayanımı (küp) kullanılabilir. Sıkışma dayanımı C50/60'dan daha yüksek olan normal veya ağır betonlar yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılırlar.

Çizelge 6.10. TS-EN 206-1 standartına göre silindir ve küp numunelerin, tek eksenli sıkışma dayanımlarına göre sınıflandırılması

<b>Beton Basınç Sınıfı</b>	<b>28 Günlük Standart Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (silindir), N/mm<sup>2</sup></b>	<b>28 Günlük Standart Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı (küp), N/mm<sup>2</sup></b>
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

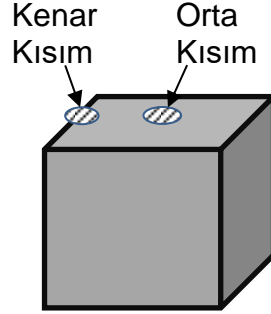
## 7. BETON NUMUNELERDEKİ SEM ÇALIŞMALARI

Tez kapsamında üretilen beton numuneden (dış ortam) alınmış örnekten SEM çalışmaları, Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Carl Zeiss AG EVO®-50 EP marka taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu 4 ana bileşenden oluşur. Bunlar sırasıyla; kolon, numune odası, vakum pompa sistemi ve elektronik kontrol ve görüntü sistemidir. Numuneler numune haznesine yerleştirildikten sonra vakum işlemi uygulanmaktadır. Daha sonra kolonun üst kısmında bulunan tungsten flama üzerine uygulanan voltaj farkının etkisi ile elektron üretimi başlamaktadır. Bu elektronlar objektif lenslerden geçerek bir demet kümesi halinde numune odasında bulunan numunenin yüzeyine çarparlar ve bu çarpma sonucunda numune ile etkileşim oluştururlar. Bu tür etkileşimler sonucu ortaya çıkan elektronlar çarpışmanın elastik olup olmamasına göre adlandırılırlar. Elastik çarpışmalar sonucunda serbest hale geçen elektronlara "birincil elektronlar" denirken elastik olmayan çarpışmalar sonucunda ortaya çıkan elektronlara ise "ikincil elektronlar" denir. Elektron mikroskobunun çalışma prensibi, beton numunelerden alınmış uçucu kül agregasıyla kireçtaşı agregasının düşük vakum altında görüntülemek ve numunenin üzerine elektron püskürtme ile görüntü oluşturmasıyla açıklanabilir. Vakuma alınmasının önemi havadaki atomlarla etkileşimin ve saçılmasının önlenmesidir. Numuneler alt girişe yerleştirildikten sonra flaman kafaya yerleştirilerek mikroskop çalıştırılır. Göstergeden vakumun oluşması takip edilir. Ardından elektronlar püskürtülerek birinci monitörde ayarlamalarla numunelerin görüntüleri yansıtılır. Gerekli ayarlamalar ile istenilen görüntüler elde edildikten sonra ikinci monitöre görüntü aktarılır ve büyütme işlemleri burada gerçekleştirilir. Numunelere ait taramalı elektron mikroskop incelemeleri ile ayrıntılı porozite, mikro çatlaklı yapı, morfolojinin tanımlanması ve kimyasal bileşim tanımlanabilmektedir. İncelemeler için beton örneklerden alınmış küçük parçalar karbonla kaplanmıştır. Tüm görüntüler, ikincil elektron (Secondary Electron; SE1) dedektörü sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Görüntüleme çalışmalarında cihaz 15 kV ivmelendirici gerilimle kullanılmıştır.

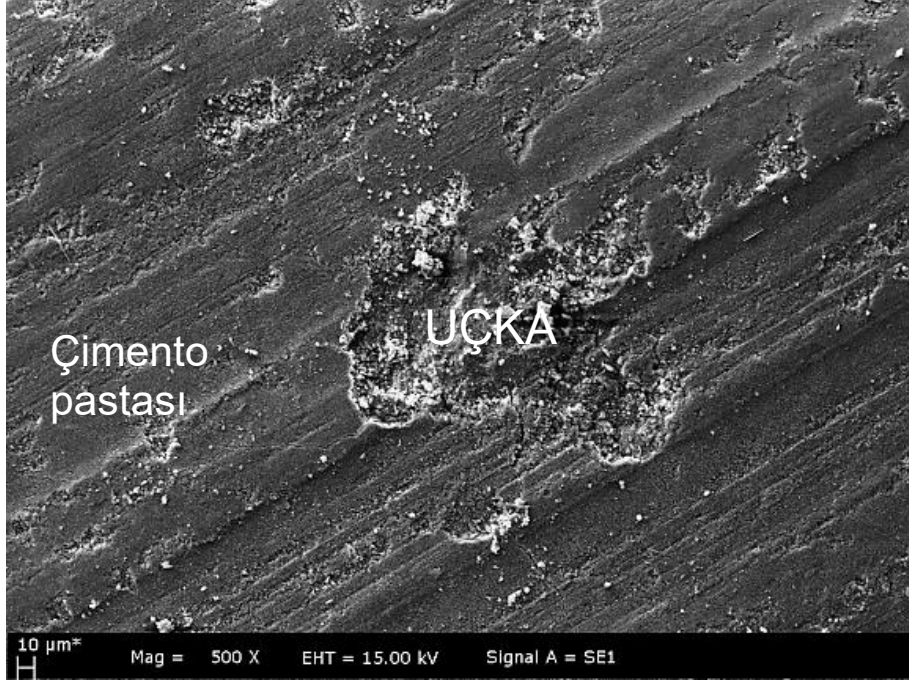
Uçucu kül agregası kullanılarak üretilmiş ve dış ortamda bekletilmiş beton numunelerden SEM görüntülemeleri için karbon kaplı örnekler hazırlanmıştır. Beton numunenin yüzey bölümünden alınan örneklerin kenar kısmından (uçucu kül agregası-çimento pastası, kireçtaşı agregası-çimento pastası) ve orta kısmından (uçucu kül agregası-çimento pastası, kireçtaşı agregası-çimento pastası) olmak üzere 500 kat ve 1000 kat büyütülmüş SEM görüntüleri çekilmiştir. Görüntüler Şekil 7.2-5'de gösterilmiştir.

### 7.1. Kenar Kısım (Uçucu Kül Agregası – Çimento Pastası)

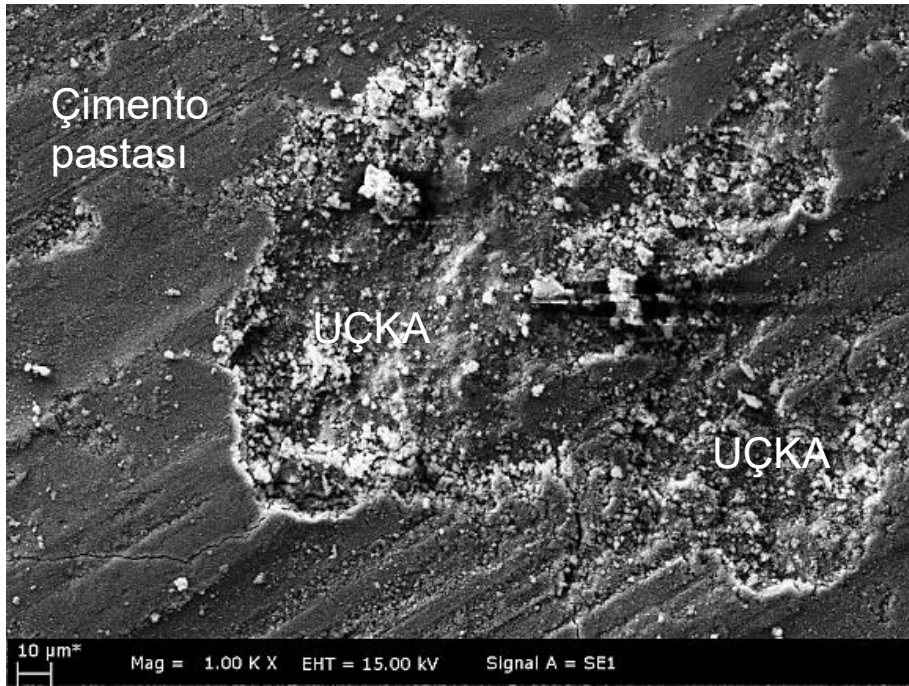
Kenar kısımdan çekilen (Şekil 7.1) SEM görüntülemelerinde uçucu kül agregasıyla çimento pastasının çok iyi düzeyde bağlanma gösterdiği gözlenmiştir (Şekil 7.2). Bu görüntüler dış ortamda 270 gün bekletilen beton örneklerine ait olmasına rağmen çimento-uçucu kül agregası ara yüzeyinde herhangi bir bozunma saptanmamıştır.



Şekil 7.1. Beton numunesinin yüzeyinden SEM görüntüleme örneklerinin alındığı bölgeler



(a)



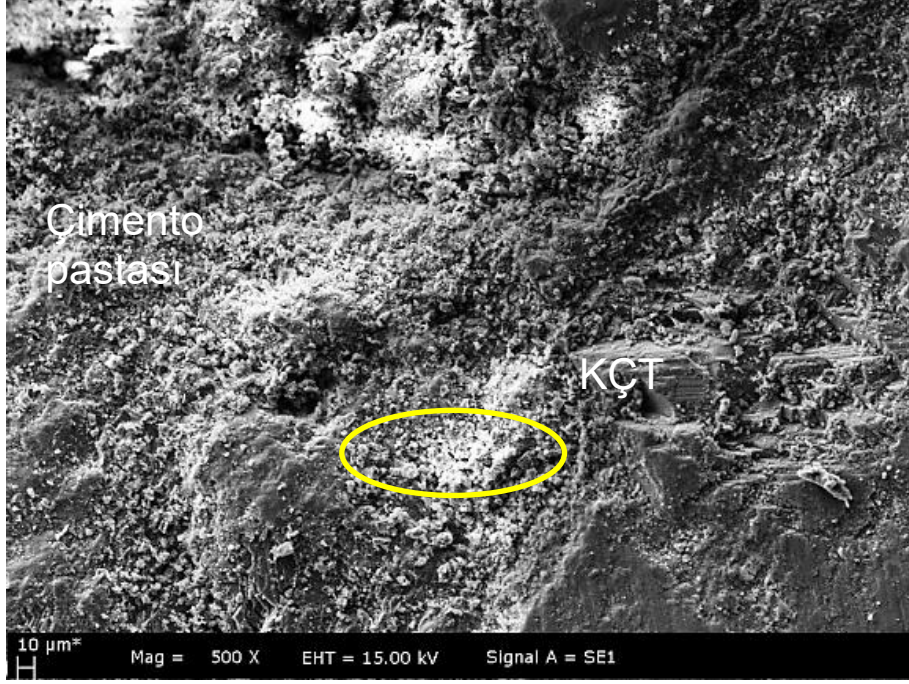
(b)

Şekil 7.2. Kenar kısım (Uçucu kül agregası, UÇKA - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş

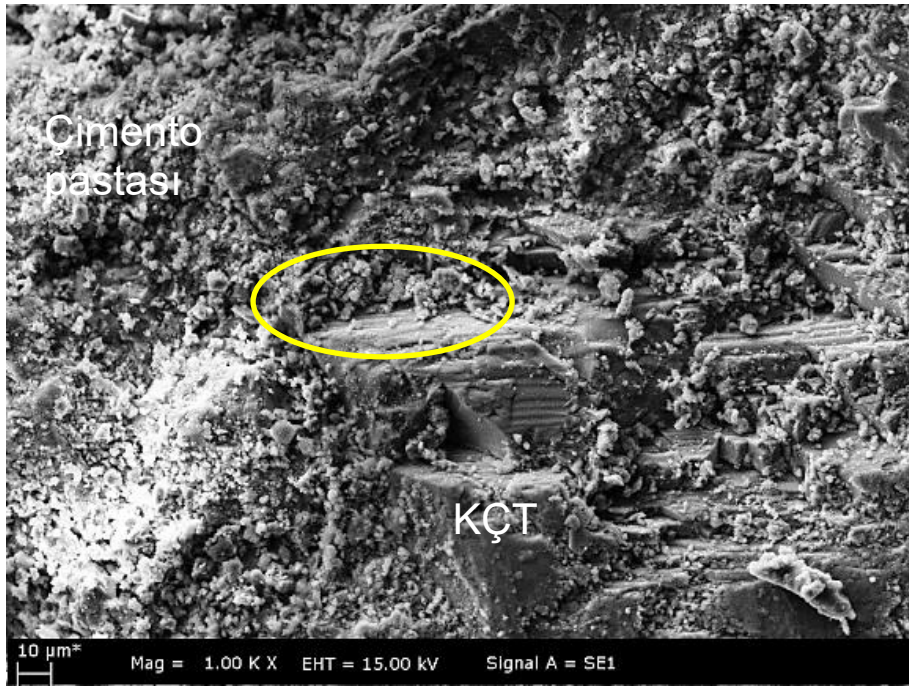
## **7.2. Kenar Kısım (Kireçtaşı Agregası – Çimento Pastası)**

Dış ortamda 270 gün bekletilen beton örneğın yüzeyinden alınan ve alınan örneğın kenarına yakın kısmından çekilen SEM görüntülerinde kireçtaşı agregasıyla çimento pastası ara yüzeyinde bazı mikro çatlaklar gözlemlenmiştir (Şekil 7.3).





(a)

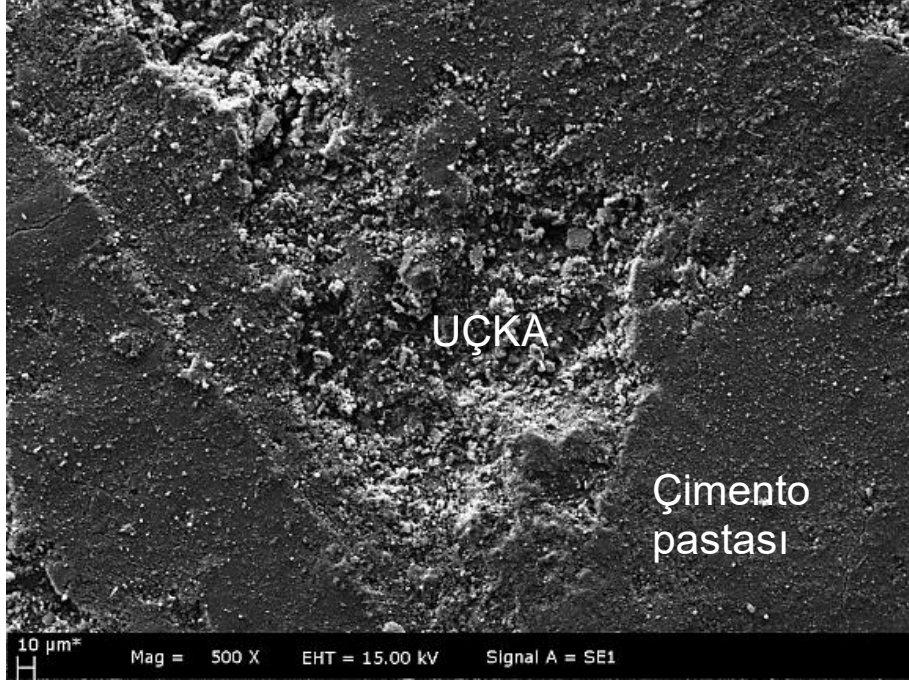


(b)

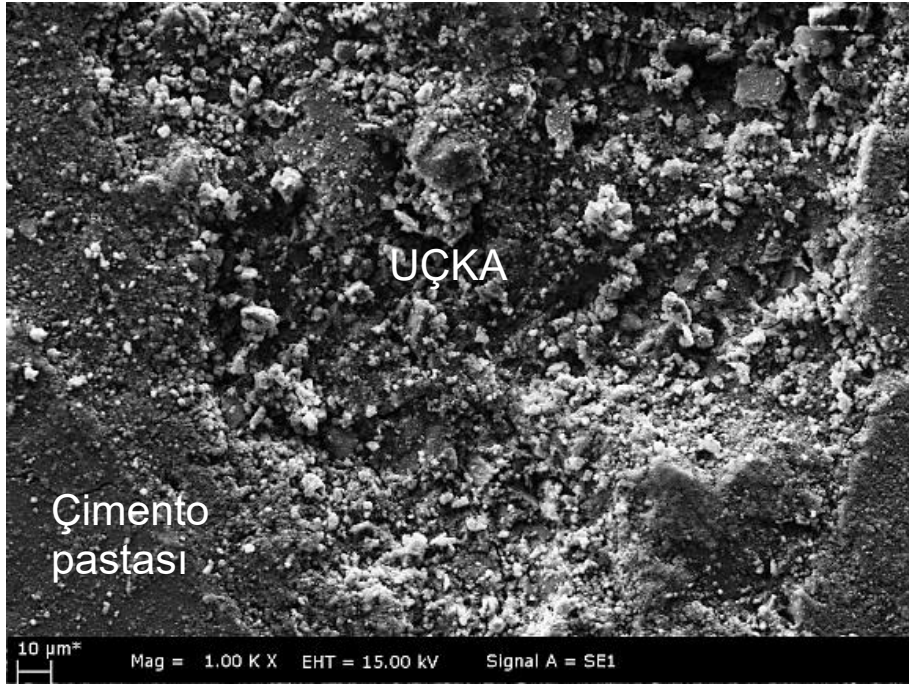
Şekil 7.3. Kenar kısım (Kireçtaşı agregası, KÇT - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş

### **7.3. Orta Kısım (Uçucu Kül Agregası – Çimento Pastası)**

270 gün atmosferik etkilere maruz kalan beton küp örneklerin orta kısmından alınan numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir. Uçucu kül agregasıyla çimento pastası arasında belirgin bir çatlak gelişimi saptanmamıştır (Şekil 7.4).



(a)

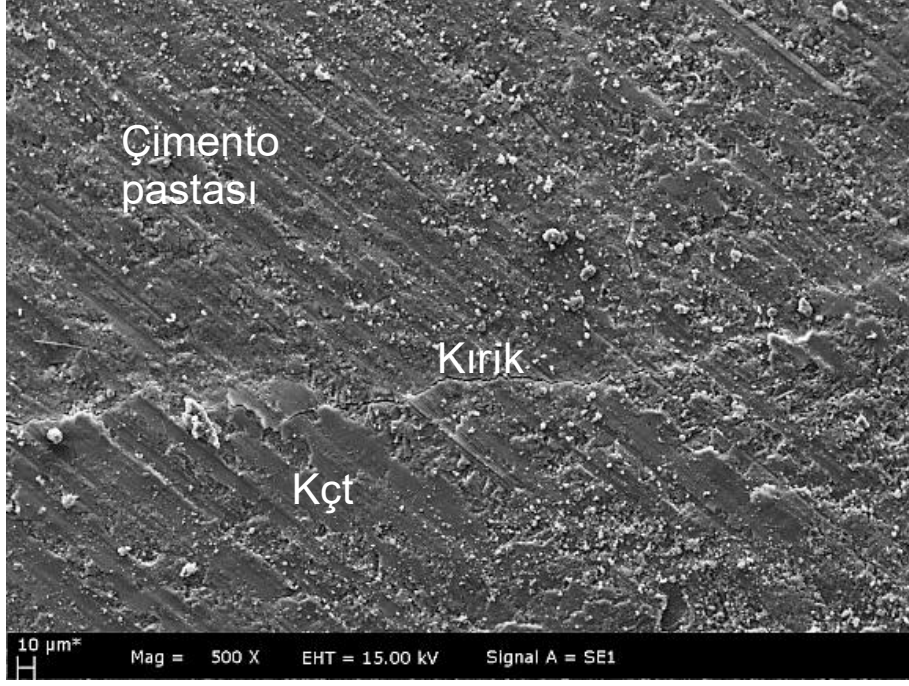


(b)

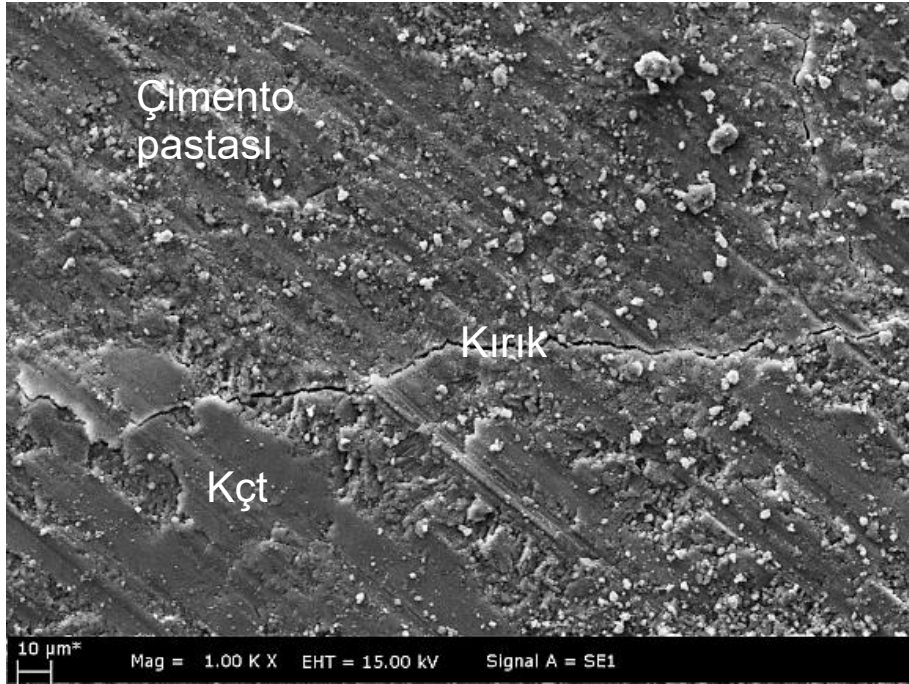
Şekil 7.4. Orta kısım (Uçucu kül agregası, UÇKA - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş

#### **7.4. Orta Kısım (Kireçtaşı Agregası – Çimento Pastası)**

Beton örneğinin orta kısmından yapılan SEM görüntülerinde kireçtaşı agregasıyla çimento pastası arasında atmosferik etkiler sonucunda çatlak gelişimleri meydana geldiği saptanmıştır (Şekil 7.5).



(a)



(b)

Şekil 7.5. Orta kısım (Kireçtaşı agregası, KÇT - Çimento pastası) (a) 500 kat büyütülmüş, (b) 1000 kat büyütülmüş

## 8. DEĞERLENDİRME VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında Yatağan Termik Santralinden uçucu kül ve Bolu Çimento Fabrikasından CEM I 42,5 R Portland Çimentosu temin edilmiş ve laboratuvar ortamında uçucu kül, Portland çimentosu ve sudan oluşan karışımla hafif-iri agrega üretimi yapılmıştır. Agrega üretimi için 18 mm çapında soğuk presleme yöntemiyle küp ve küre geometrisi arasında bir şekle sahip agrega üretimi sağlayan kalıp tasarlanmıştır. Bu sayede kaya birimlerinin müsait olmadığı çeşitli alanlarda (inşaat vb.) yeni bir agrega kaynağı alternatifi sunulması planlanmıştır. Uçucu külden üretilmiş agregaların fiziko-mekanik özellikleri belirlenmiş, içine uçucu kül agregası ve kireçtaşı agregası ilave edilerek üretilen beton örneklerine ait fiziko-mekanik özellikleri saptanmıştır. Betonlara çeşitli yaşlandırma deneyleri (donma-çözülme, ıslanma-kuruma, dış ortam, taze örnek) ile dayanım özelliklerindeki değişimler incelenmiştir.

Tez kapsamında amaçlanan çalışmanın temeli termik santrallerin bacalarında elektro filtrelerle tutulan uçucu küllere herhangi bir eleme işlemi uygulanmadan soğuk bağlama (presleme) yöntemiyle beton karışımları için farklı boyutlarda iri ve hafif agrega üretim sağlayan kalıp tasarımı ve agrega üretim yöntemi geliştirilmiştir. Üretim sağlayan kalıp “Bir Agrega Kalıbı” adı altında Türk Patent ve Marka Kurumu tarafından koruma sağlayan “İncelemeli Patent Belgesi” verilmiştir. Tasarlanan bu kalıba ve üretilen agregalara ait birçok avantajlar elde edilmiş ve gözlemlenmiştir. Bu gözlemler aşağıda maddeler halinde belirtilmiş ve tartışılmıştır.

- 1) Uçucu külden agrega üretimi sırasında uçucu külün eleklerle elenmesine gerek yoktur. Termik santralden temin edilen uçucu kül doğrudan veya çimento ve sudan oluşan karışımlar halinde kalıplara dökülerek uçucu kül agregası elde edilebilmektedir. Kısaca; agrega üretimi öncesi ikinci bir işleme ihtiyaç duyulmamıştır.
- 2) Linyit kömürü yakan termik santrallerde radyoaktivite oranı genellikle göz ardı edilen ancak çok önem arz eden bir durumdur. Linyit kömürünün çıkartılması sırasında doğal çevrede mevcut olan radyoaktif elementler kömürle birlikte yeraltından çıkarılmakta, organik bünyeye bağlı olan

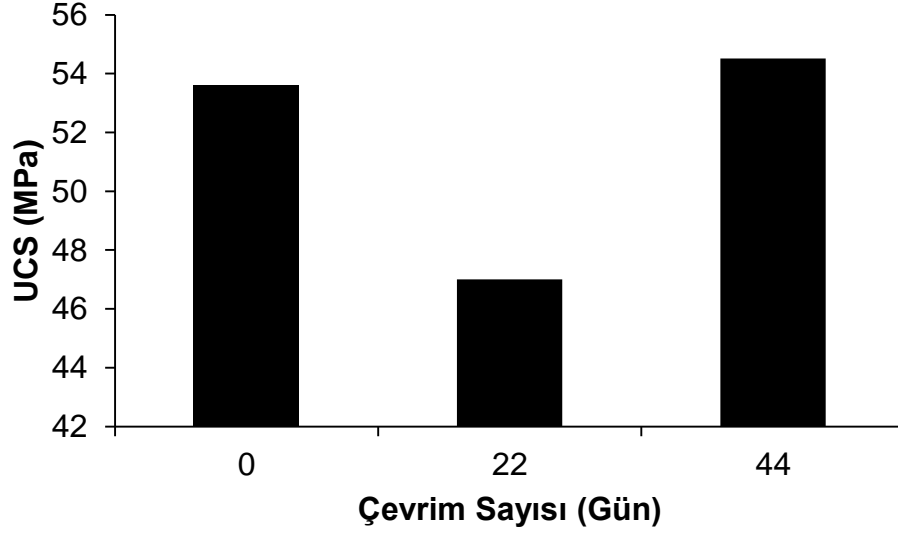
Uranyum ve Thoryum, kömürün yandıktan sonraki organik yapısı olan kül üzerinde birikmektedir. Bu nedenle havaya atılan ya da kazandan alınan küllerin radyoaktivitesi kömüre göre daha fazla olmaktadır. Turhan vd., [113] yapmış oldukları çalışmada, Yatağan termik santralinden elde edilen pulverize uçucu külün radyoaktivite sonuçlarını belirlemek için  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ve  $^{40}\text{K}$  aktivite konsantrasyonlarını ölçmüşler ve bunun sonucunda Yatağan uçucu külüne ait radyoaktivite sonuçlarının Avrupa Birliği normlarının altında olduğunu ve zararlı olmadığını belirlemişlerdir.

- 3) Üretilen agregaların geometrileri küp ve küre arasında bir geometriye sahip agregalar üretilmektedir. Bu tip agregalar beton işlenebilirliği ve dayanımı açısından en uygun tip agregadır.
- 4) Tez kapsamında geliştirilen kalıp ile herhangi bir pres makinasına rahatlıkla yerleştirilebilmektedir. Kalıp ile presleme için özel bir cihaza ihtiyaç duyulmamıştır.
- 5) Soğuk bağlama (presleme) yöntemi ile elde etmiş olduğumuz agregalar iki gün havada kurutulmakta daha sonra aynı beton kürlenme işlemlerinde olduğu gibi kürlenebilmektedir.
- 6) Bu yöntemde üretilen agregalara hiçbir şekilde ısı işlem (sinterleme) uygulanmamıştır. Bu nedenle mevcut yöntemlere göre çok ekonomiktir. Sinterleme işleminde peletleme yöntemi ile elde edilen uçucu kül agregalarının dayanımları artırılabilen ve su emme kapasiteleri düşürülebilmektedir. Ancak bu işlem 1000-1200°C derece arasında bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için maliyeti yüksektir. Peletleme olarak adlandırılan yöntemde bentonit, çimento, kaolin ve bunun gibi bağlayıcı malzemeler uçucu küle karıştırılarak peletleme cihazının haznesine dökülmekte ve peletleme cihazının delikli disklerinde geçirilerek küre şeklinde agregalar elde edilmektedir. Bu yöntemdeki amaç, araştırmacıdan araştırmacıya fark eden peletleme cihazları kullanılarak uçucu kül karışımının presleme yapılmadan sadece yuvarlama ile küre şeklinde agrega üretilmesidir. Bazı araştırmacılar ise peletleme sonrası, agregaları fırınlarda 1000-1200°C arasında sinterleyerek (pişirerek) agregaların dayanımını artırmaya çalışmışlardır.

- 7) Bu tez kapsamında mevcut yöntemlerde olduğu gibi agrega üretilmekte ve üretilen agregaların dayanımı betonlarda kullanılan kireçtaşı agregasının dayanımına yaklaşmaktadır ve az da olsa yüksektir. Bu yöntemle elde edilen agregaların dayanım (Nokta yükü dayanımı yaklaşık olarak 5,9 MPa olarak belirlenirken, kireçtaşı agregasının yaklaşık 5,7 MPa) olarak belirlenmiştir. Bu değerler mevcut yöntemlerle üretilen agregalardan her zaman daha yüksektir. Ayrıca uçucu külden üretilen agregaların yoğunlukları yaklaşık 1,83 g/cm<sup>3</sup>, kireçtaşı agregalarının yoğunlukları 2,69 g/cm<sup>3</sup> olarak belirlenmiştir.
- 8) Mevcut yöntemlerle uçucu külden üretilen agregalar yüksek gözenekliliğe ve su emme kapasitesine sahiptir. Bu agregaların su emme kapasitesini düşürmek ve şişmesini engellemek için sinterlenmesi gerekmektedir. Soğuk bağlama yönteminde ise yöntemin temelinde presleme ile uçucu külden agrega üretimi bulunduğu için üretilen agregaların gözenekliliği %10 civarındadır. Bu yöntemde bağlayıcı malzeme olarak düşük oranda çimento kullanılmıştır. Bu nedenle betona karıştırıldıktan sonra beton dayanımında herhangi bir dayanım azalmasına neden olma gibi durumlar gözlenmemiştir.
- 9) Soğuk bağlama yönteminde sabit hacimlere sahip agrega kalıbı kullanıldığı için istenilen boyutlarda istenilen miktarlarda uçucu külden agrega üretilmektedir.
- 10) Bu yöntemde uçucu kül karışımında bağlayıcı malzeme olarak çimento kullanıldığı için beton karışımlarında üretilen uçucu kül agregasının çimento ile birleşimi çok iyi düzeyde gerçekleşmiştir.
- 11) Kireçtaşı agregasından üretilen beton numunenin maliyeti yaklaşık 52 TL/m<sup>3</sup> iken uçucu kül agregasından üretilen beton numunenin maliyeti yaklaşık 41 TL/m<sup>3</sup>'tür. Maliyet açısından değerlendirildiğinde uçucu külden üretilmiş beton numunenin, kireçtaşı agregasından üretilmiş beton numuneye göre üretim maliyeti %21,2 daha ucuzdur.
- 12) Donma-çözülme deneyleri sonrası fiziko-mekanik özelliklerdeki meydana gelen değişimler Çizelge 8.1'de verilmiştir. Doygun ve kuru yoğunluk değerlerinde çok düşük oranlarda değişimler meydana gelmiştir. Deneyler sonrası ağırlıkça su emme ve porozite değerlerinde yüksek oranda azalma saptanmıştır. P<sub>dalga</sub> hızı değerlerinde donma-çözülme 44 çevrim sonunda



çok düşük oranda (%1,35) değişim meydana gelmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinde ise 44 çevrim sonunda %1,73 oranında bir değişim tespit edilmiştir. Genel olarak 44 çevrim donma-çözülme deneyleri sonrası fiziko-mekanik değerlerde fazla bir değişim olmadığı saptanmıştır. Donma-çözülme deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanımının çevrim sayısına göre grafiği Şekil 8.1'de verilmiştir.



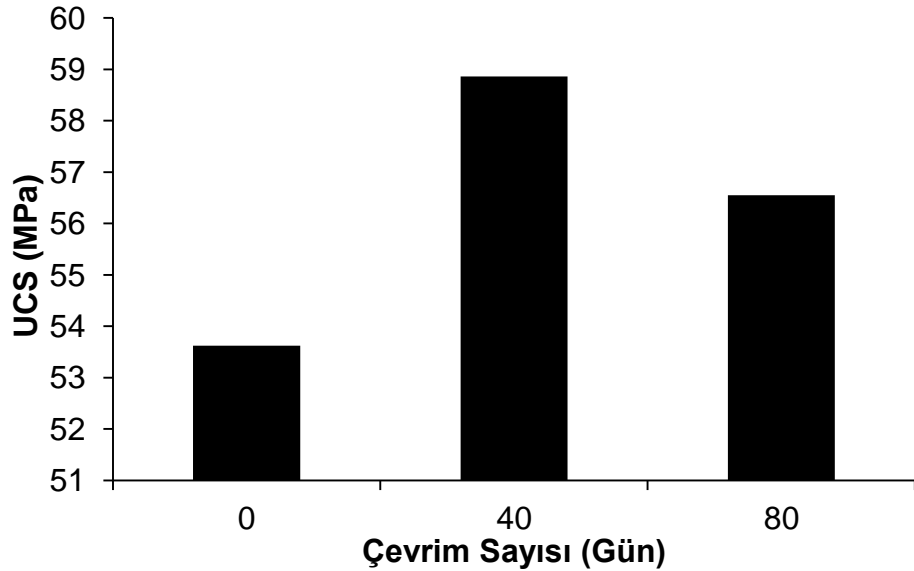
Şekil 8.1. Donma-çözülme deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği

Çizelge 8.1. Uçucu kül agregası kullanılmış beton numunelerin donma-çözülme deneyi çevrimleri sonrası fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler

<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta n</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta n</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	-49,28		
<b>22</b>	-33,80	-40,93	7,81
	-39,73		
	-66,67		
<b>44</b>	-62,65	-65,74	2,75
	-67,90		
<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta\rho_{\text{sat}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta\rho_{\text{sat}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	-0,23		
<b>22</b>	-0,22	-0,23	0,01
	-0,24		
	-0,37		
<b>44</b>	-0,41	-0,38	0,02
	-0,37		
<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta\rho_{\text{dry}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta\rho_{\text{dry}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	0,23		
<b>22</b>	0,11	0,16	0,06
	0,15		
	0,34		
<b>44</b>	0,30	0,34	0,04
	0,39		
<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta A_s</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta A_s</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	-49,39		
<b>22</b>	-33,88	-41,03	7,83
	-39,82		
	-66,78		
<b>44</b>	-62,76	-65,86	2,75
	-68,03		
<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta P_{\text{dalga}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta P_{\text{dalga}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	0,61		
<b>22</b>	2,20	0,94	1,14
	0,00		
	0,93		
<b>44</b>	2,48	1,35	1,00
	0,62		
<b>DÇ</b>	<b><math>\Delta UCS</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta UCS</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>
	-15,22		
<b>22</b>	-11,62	-12,33	2,60
	-10,16		
	-3,87		
<b>44</b>	7,66	1,73	5,77
	1,39		

DÇ: Donma-çözülme,  $\sigma$ : Standart sapma,  $\Delta$ : Değişim değeri,  $\bar{X}\Delta$ : Ortalama değişim değeri, n: gözeneklilik,  $\rho_{sat}$ : doymun yoğunluk,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk,  $A_s$ : Ağırlıkça su emme,  $P_{dalga}$ : Dalga hızı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı

13) Islanma-kuruma deneyleri sonrası beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen fiziko-mekanik özellikler sonrası meydana gelen değişimler Çizelge 8.2'de verilmiştir. Doymun ve kuru yoğunluk üzerinde yapılan yüzdece hesaplamada çok küçük oranda değişimler gözlenmiştir. Ağırlıkça su emme ve porozite değerlerinde gözlenen durum fazla miktarlarda (40 çevrim ve 80 çevrim arasındaki farkı %15 civarında) azalma şeklinde gerçekleşmiştir.  $P_{dalga}$  hızı değerlerinde ıslanma-kuruma 80 çevrim sonunda çok düşük oranda (%3,66) oranında değişim meydana gelmiştir. Tek eksenli sıkışma dayanımı değerlerinde ise 80 çevrim sonucunda 40 çevrime kıyasla %4 civarında değişim tespit edilmiştir. Genel olarak 80 çevrim ıslanma-kuruma deneyleri sonrası fiziko-mekanik değerlerde büyük bir değişim olmadığı saptanmıştır. Islanma-kuruma deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanımının çevrim sayısına göre grafiği Şekil 8.2'de verilmiştir.



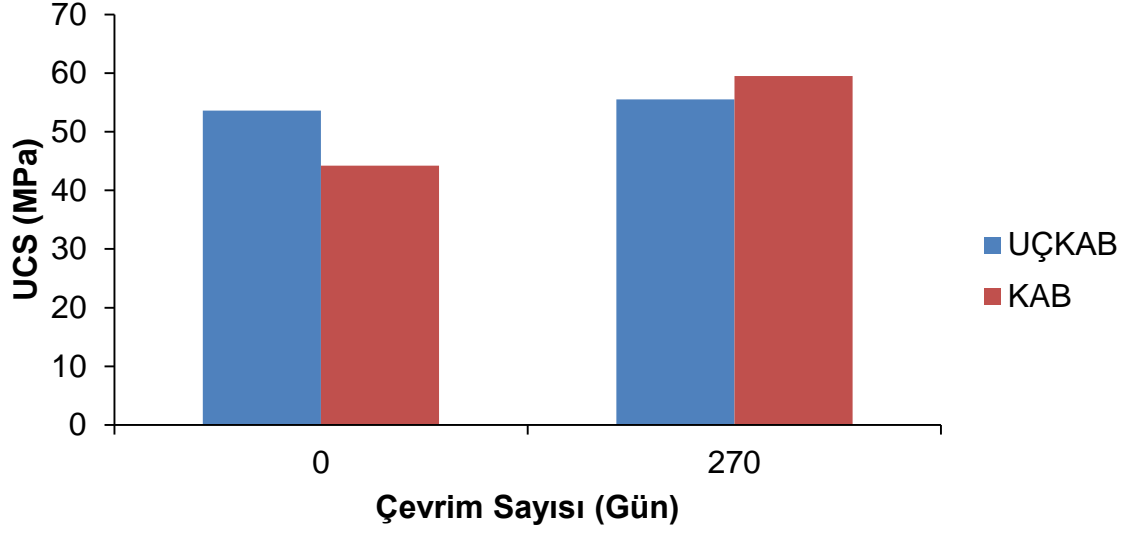
Şekil 8.2. Islanma-kuruma deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği

Çizelge 8.2. Uçucu kül agregası kullanılmış beton numunelerin ıslanma-kuruma deneyi çevrimleri sonrası fiziko-mekanik özelliklerdeki değişimler

IK	$\Delta n$ (%)	$\bar{X}\Delta n$ (%)	$\sigma$
	-60,23		
40	-55,70	-55,06	5,51
	-49,25		
	-72,29		
80	-74,42	-71,48	3,41
	-67,74		
IK	$\Delta\rho_{\text{sat}}$ (%)	$\bar{X}\Delta\rho_{\text{sat}}$ (%)	$\sigma$
	-0,42		
40	-0,46	-0,46	0,04
	-0,49		
	-0,90		
80	-1,09	-0,95	0,12
	-0,87		
IK	$\Delta\rho_{\text{dry}}$ (%)	$\bar{X}\Delta\rho_{\text{dry}}$ (%)	$\sigma$
	0,30		
40	0,14	0,13	0,17
	-0,04		
	-0,10		
80	0,00	-0,13	0,15
	-0,29		
IK	$\Delta A_s$ (%)	$\bar{X}\Delta A_s$ (%)	$\sigma$
	-60,35		
40	-55,76	-55,11	5,58
	-49,23		
	-72,26		
80	-74,45	-71,45	3,47
	-67,65		
IK	$\Delta P_{\text{dalga}}$ (%)	$\bar{X}\Delta P_{\text{dalga}}$ (%)	$\sigma$
	2,81		
40	2,20	2,94	0,81
	3,80		
	4,38		
80	3,44	3,66	0,63
	3,16		
IK	$\Delta UCS$ (%)	$\bar{X}\Delta UCS$ (%)	$\sigma$
	5,38		
40	18,78	9,86	7,73
	5,41		
	4,70		
80	7,30	5,48	1,59
	4,43		

IK: Islanma-kuruma,  $\sigma$ : Standart sapma,  $\Delta$ : Değişim değeri,  $\bar{X}\Delta$ : Ortalama değişim değeri, n: gözeneklilik,  $\rho_{sat}$ : doymun yoğunluk,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk, As: Ağırlıkça su emme,  $P_{dalga}$ : Dalga hızı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı

14) Dış ortam deneyleri sonrası beton numuneler üzerinde gerçekleştirilen fiziko-mekanik özellikler sonrası meydana gelen değişimler Çizelge 8.3'de verilmiştir. Bu yaşlandırma deneyinde kireçtaşı katkılı beton numunesi (3 adet) ve uçucu kül agregası katkılı beton (3 adet) olmak üzere 6 adet beton örneğine 270 gün boyunca dış ortamda bekletilmiş olup fiziko-mekanik değerlerindeki farklar incelendiğinde uçucu kül agregalı beton numunelerin doymun yoğunlukları kireçtaşı agregalı betonlara göre fazla olup ancak kuru yoğunluklardaki durum uçucu kül agregasının yoğunluğunun kireçtaşı olanlara göre azaldığı saptanmıştır. Ağırlıkça su emme değerindeki durum kireçtaşı agrega katkılı betonların uçucu kül agregalı olanlara göre fazla olduğu yönündedir. Bu durum kireçtaşı agregasının kırıldığını, daha fazla su emdiği şeklinde yorumlanmıştır. Kireçtaşı kullanılmış beton örneklerin  $P_{dalga}$  hızları uçucu kül agregasına göre değeri düşmüştür. Bunun nedeni sadece kireçtaşı kullanılmış beton bloklarında atmosferik etkiler sonucu çatlak gelişimleridir. 270 günlük dış ortam testinde uçucu kül agregasıyla üretilen beton örneklerin tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinde azalma tespit edilmemiştir hatta dayanım değerlerinde küçük oranda artış olduğu görülmüştür. Sadece kireçtaşı agregası kullanılarak üretilen beton örneklerin dayanımları ile uçucu kül agregası kullanılarak üretilen beton örneklerin dayanım değerleriyle yaklaşık aynıdır. Dış ortam deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanımının çevrim sayısına göre grafiği Şekil 8.3'de verilmiştir.



Şekil 8.3. Dış ortam deneyine ait ortalama tek eksenli sıkışma dayanım değerlerinin çevrim sayısına göre grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)

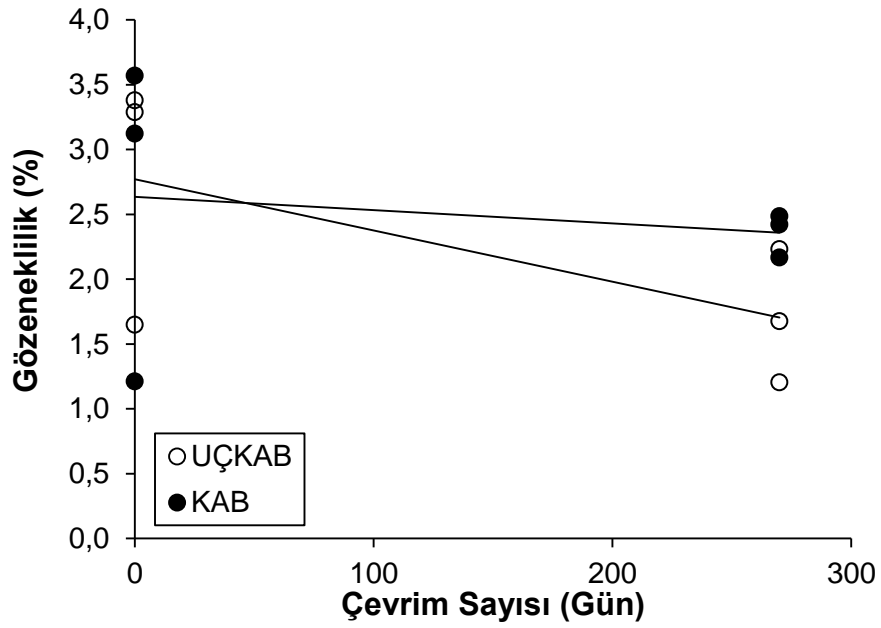
Çizelge 8.3. Dış ortam deneyinde uçucu kül agregası ve kireçtaşı agregası kullanılmış beton örneklerin fiziko-mekanik özelliklerindeki değişimler

<b>Agrega</b>	<b><math>\Delta n</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta n</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	-26,92			
<b>UÇKAB</b>	-49,04	-36,64	11,30	3
	-33,96			
	100,00			
<b>KAB</b>	-30,36	13,01	75,34	3
	-30,61			
	<b><math>\Delta\rho_{\text{sat}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta\rho_{\text{sat}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	0,14			
<b>UÇKAB</b>	1,36	0,47	0,78	3
	-0,10			
	-0,29			
<b>KAB</b>	-0,19	-0,28	0,08	3
	-0,36			
	<b><math>\Delta\rho_{\text{dry}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta\rho_{\text{dry}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	-0,75			
<b>UÇKAB</b>	0,38	-0,19	0,57	3
	-0,22			
	-0,83			
<b>KAB</b>	0,28	-0,16	0,59	3
	0,06			
	<b><math>\Delta A_s</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta A_s</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	-26,72			
<b>UÇKAB</b>	-49,17	-36,61	11,46	3
	-33,94			
	101,68			
<b>KAB</b>	-30,55	13,49	76,37	3
	-30,65			
	<b><math>\Delta P_{\text{dalga}}</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta P_{\text{dalga}}</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	1,56			
<b>UÇKAB</b>	1,89	1,88	0,32	3
	2,20			
	2,50			
<b>KAB</b>	1,57	1,67	0,79	3
	0,93			
	<b><math>\Delta UCS</math> (%)</b>	<b><math>\bar{X}\Delta UCS</math> (%)</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>N</b>
	-3,52			
<b>UÇKAB</b>	14,26	6,02	8,96	3
	7,31			
	40,52			
<b>KAB</b>	29,79	34,65	5,44	3
	33,65			

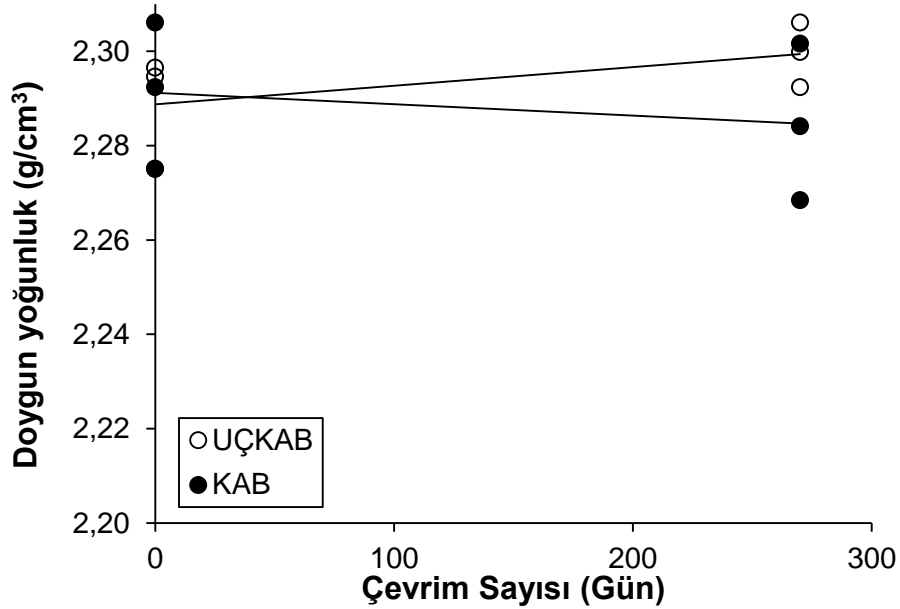
UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri,  $\sigma$ : Standart sapma,  $\Delta$ : Değişim değeri,  $\bar{X}\Delta$ : Ortalama değişim değeri, n: gözeneklilik,  $\rho_{sat}$ : doymun yoğunluk,  $\rho_{dry}$ : kuru yoğunluk, As: Ağırlıkça su emme,  $P_{dalga}$ : Dalga hızı, UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı



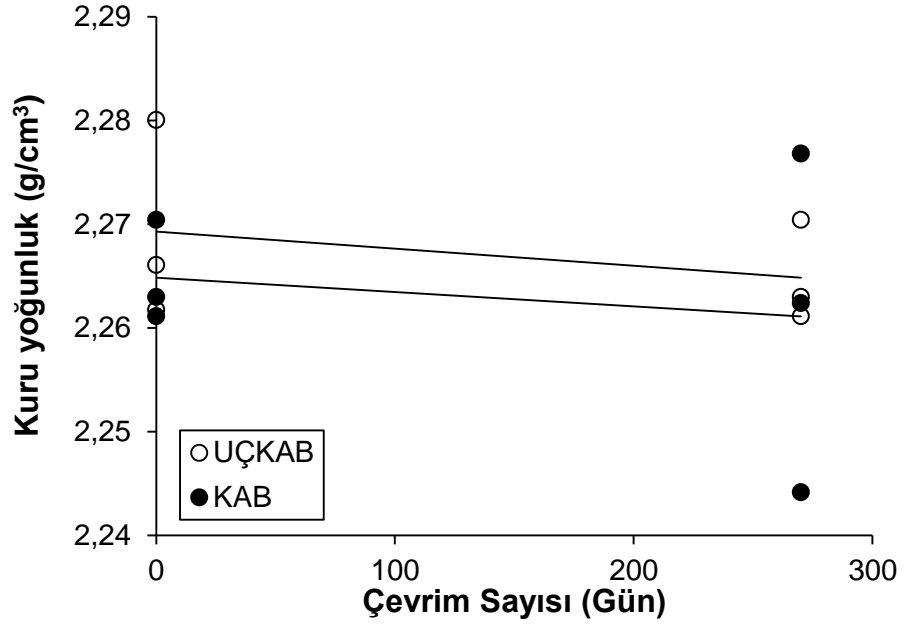
Dış ortam deneyine ait beton numunelerin fiziko-mekanik özelliklerinin çevrim sayılarına göre grafiksel gösterimi Şekil 8.4a-f'de gösterilmiştir.



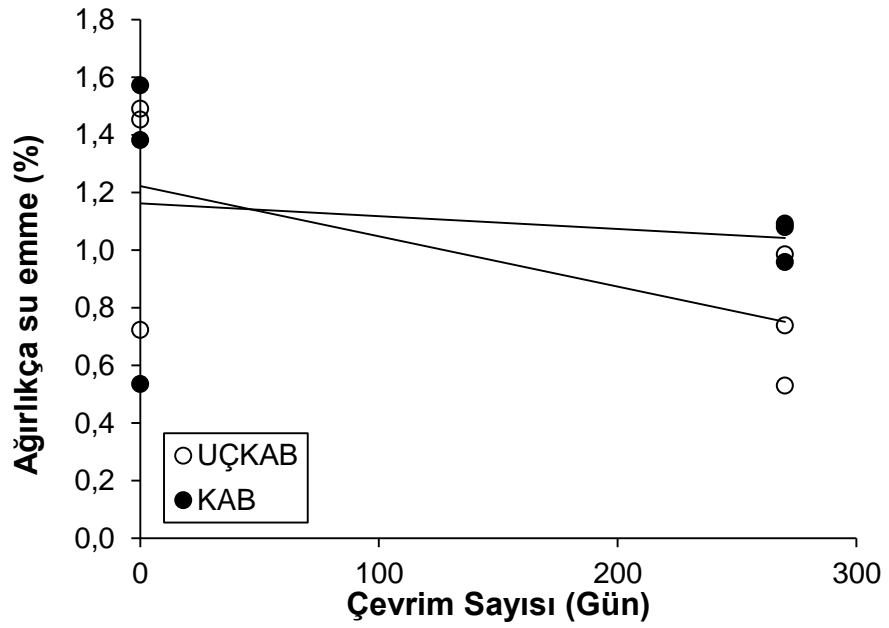
Şekil 8.4. (a) Gözeneklilik, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)



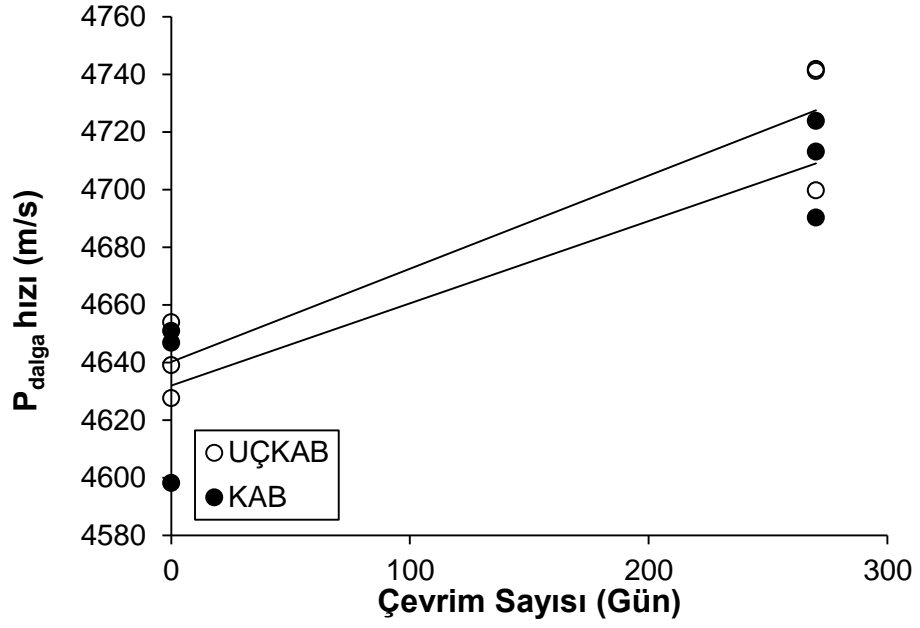
Şekil 8.4. (b) Doygun yoğunluk, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)



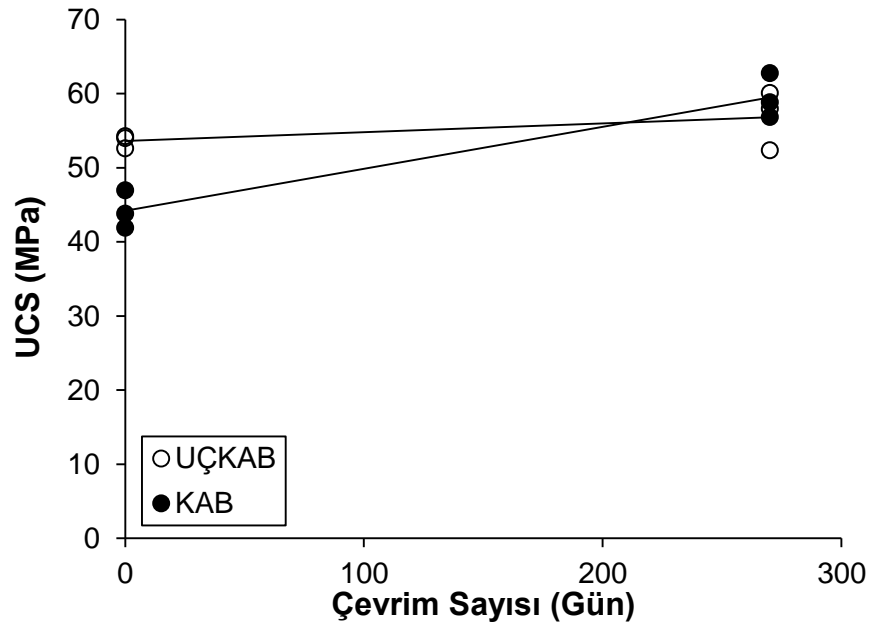
Şekil 8.4. (c) Kuru yoğunluk, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)



Şekil 8.4. (d) Ağırlıkça su emme, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)



Şekil 8.4. (e)  $P_{dalga}$  hızı, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)



Şekil 8.4. (f) UCS: Tek eksenli sıkışma dayanımı, çevrim sayısı grafiği (UÇKAB: Uçucu kül agregalı beton numuneleri, KAB: Kireçtaşı agregalı beton numuneleri)

## 9. ÖNERİLER

Bu çalışmanın devamında üretilen uçucu kül agregasının detaylı mineralojik incelemesi yapılmalıdır. Daha fazla örnek sayısı ile deneyler gerçekleştirilerek uçucu kül agregasının performansı değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Aruntaş, H.Y., Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 1, 193-203, Ankara, **2006**.
- [2] Binal, A., The Effects of High Alkaline Fly Ash on Strength Behaviour of a Cohesive Soil, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1-11, **2016**.
- [3] TÜİK., Termik Santral Su, Atıksu ve Atık İstatistikleri, **2014**.
- [4] Ghazali, Md., Kaushal, O.P., Characteristics of Fly Ash from Thermal Power Plants and its Management along with Settling Pond Design, *International Journal of Engineering Research & Science (IJOER)*, 1, 24-32, **2015**.
- [5] Bhattacharjee, U., Kandpal, T.C., Potential of fly ash utilisation in India, *Energy*, 27, 151-166, **2002**.
- [6] Tütünlü, F., Atalay, Ü., Utilization of fly ash in manufacturing of building bricks, *International Ash Utilization Symposium, USA*, **2001**.
- [7] Verma, C.L., Handa, S.K., Jain, S.K., Techno-commercial perspective study for sintered fly ash lightweight aggregates in India, *Construction and Building Materials*, 12, 341-346, **1998**.
- [8] Chang, T.P., Shieh, M.M., Fracture properties of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 26, 181-188, **1996**.
- [9] Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E., Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34, 1121-1130, **2004**.
- [10] Harikrishnan, K.I., Ramamurthy, K., Influence of Pelletization Process on the Properties of Fly Ash Aggregates, *Waste Management*, 26, 846-852, **2006**.
- [11] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Öz, H.Ö., Properties of lightweight aggregates produced with cold-bonding pelletization of fly ash and ground granulated blast furnace slag, *Materials and Structures*, 45, 1535-1546, **2012**.
- [12] Manikandan, R., Ramamurthy, K., Influence of fineness of fly ash on the aggregate pelletization process, *Cement & Concrete Composites*, 29, 456-464, **2007**.
- [13] Priyadarshini, P., Ganesh, M., Santhi, A.S., Experimental study on cold bonded fly ash aggregates, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2, 493-501, **2011**.

- [14] Priyadharshini, P., Ganesh, M., Santhi, A.S., Effect of cold bonded fly ash aggregates on strength & restrained shrinkage properties of concrete, *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science and Management (ICAESM)*, **2012**.
- [15] Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Mahmood, S.F., Öz, H.Ö., Mermertaş, K., Recycling ground granulated blast furnace slag as cold bonded artificial aggregate partially used in self-compacting concrete, *Journal of Hazardous Materials*, 235-236, 352-8, **2012**.
- [16] Alzate, C.A., Chejne, F., Valdés, C.F., Berrio, A., Cruz, J.D.L., Londoño, C.A., CO-gasification of pelletized wood residues, *Fuel*, 88, 437-445, **2009**.
- [17] Sivakumar, A., Gomathi, P., Pelletized fly ash lightweight aggregate concrete: A promising material, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 3, 42-48, **2012**.
- [18] Kayali, O., Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 22, 2393-2399, **2008**.
- [19] Gesoğlu, M., Ozturan, T., Güneyisi, E., Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates, *Construction and Building Materials*, 21, 1869-1878, **2007**.
- [20] Ramamurthy, K., Harikrishnan, K.I., Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate, *Cement & Concrete Composites*, 28, 33-38, **2006**.
- [21] Manikandan, R., Ramamurthy, K., Effect of curing method on characteristics of cold bonded fly ash aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 30, 848-853, **2008**.
- [22] Joseph, G., Ramamurthy, K., Workability and strength behaviour of concrete with cold-bonded fly ash aggregate, *Materials and Structures*, 42, 151-160, **2009**.
- [23] Papadakis, V.G., Effect of fly ash on Portland cement systems Part II. High-calcium fly ash, *Cement and Concrete Research*, 30, 1647-1654, **2000**.
- [24] Wedding, P., Al-Mana, A., Haneef, M., Maslehuddin, M., Effect of Cement Replacement, Content, and Type on the Durability Performance of Fly Ash Concrete in the Middle East, *Cement, Concrete and Aggregates*, 8, 86 p., **1986**.
- [25] Hooton, R., Naik, T., Ramme, B., Tews, J., Use of High Volumes of Class C and Class F Fly Ash in Concrete, *Cement, Concrete and Aggregates*, 16, 12 p., **1994**.
- [26] Cao, D.Z., Selic, E., Herbell, J.D., Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China, *Journal of Zhejiang University Science*, 9, 681-687, **2008**.

- [27] Foner, H.A., Thomas, L.R., James, C.H., Uschi, M.G., Characterization of fly ash from Israel with reference to its possible utilization, *Fuel*, 78, 215-223, **1999**.
- [28] Philleo, R.E., Compressive strength of low cement/high fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, 18, 571-583, **1988**.
- [29] Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Pürsünlü, Ö., Mermerdaş, K., Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates, *Composites Part B Engineering*, 53, 258-266, **2013**.
- [30] Bilir, T., Gencil, O., Topçu, İ.B., Properties of mortars with fly ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, 93, 782-789, **2015**.
- [31] Terzić, A., Pezo, L., Mitić, V., Radojević, Z., Artificial fly ash based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, *Ceramics International*, 41, 2714-2726, **2015**.
- [32] Shafigh, P., Nomeli, M.A., Alengaram, U.J., Mahmud, H.B., Jumaat, M.Z., Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash, *Journal of Cleaner Production*, 135, 148-157, **2016**.
- [33] Lo, T.Y., Cui, H.Z., Effect of Porous Lightweight Aggregate on Strength of Concrete, *Materials Letters*, 58, 916-919, **2004**.
- [34] Rossignolo, J.A., Agnesini, M.V.C., Morais, J.A., Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates, *Cement & Concrete Composites*, 25, 77-82, **2003**.
- [35] Tangtermsirikul, S., Wijeyewickrema, A.C., Strength Evaluation of Aggregate Made from Fly Ash, *Science Asia*, 26, 237-241, **2000**.
- [36] Tsai, C.T., Chang, C.C., Li, L.S., Kung, T.C., Recycling Lime Sludge from CPDC An-Shun Site as Coarse Aggregates through Cold-bonding Technique, *Advanced Materials Research*, 343-344, 283-288, **2012**.
- [37] Erdoğan, T.Y., *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, **2004**.
- [38] Helmuth, R., Fly Ash in Cement and Concrete, *Portland Cement Association*, Skokie, IL, p.203, **1987**.
- [39] TS 639, Uçucu Küller-Çimentoda Kullanılan, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, **1975**.
- [40] TS EN 450, Uçucu kül - Betonda kullanılan - Bölüm 1: Tarif, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, **2008**.
- [41] Anon, An Investigation of the Pozzolanic Nature of Coal Ashes, *Engineering News*, 71, 1334-1335, **1914**.

- [42] Price, W.H., Pozzolans-A Review, *Journal of the American Concrete Institute*, 225-234, **1975**.
- [43] Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W., Davis, H.E., Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash, *ACI Journal Proceedings*, 33, 577-612, **1937**.
- [44] Berry, E.E., Malhotra, V.M., Fly Ash in Concrete, 223-229, Ottawa, **1986**.
- [45] Türker, P., Erdoğan, B., Katnas, F., Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara, **2003**.
- [46] Tokyay, M., Betonda Uçucu Kül Kullanımı, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, 29-36, Ankara, **1993**.
- [47] Tangüler, M., Gürsel, A. P., Meral, Ç., Türkiye'de Uçucu Küllü Betonlar İçin Yaşam Döngüsü Analizi, *9. Ulusal Beton Kongresi*, 431-441, **2015**.
- [48] ASTM, *Annual book of ASTM standards, concrete and aggregates, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, C 618-05, V.04.02.*, American Society for Testing Materials, **2005**.
- [49] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1:Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, **2002**.
- [50] Aitcin, P.C., Autefage, F., Carles-Gibergues, A., Comparative Study of the Cementitious Properties of Different Fly Ashes, *Proceedings of 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1, 91-114, Madrid, **1986**.
- [51] ACI Committee 226, Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, 84, 381-409, **1987**.
- [52] Ahmaruzzaman, M., A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 327-363, **2010**.
- [53] Güler, G., Güler, E., İpekoğlu, Ü., Mordoğan, H., Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları, *Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2005*, İzmir, **2005**.
- [54] Roy, W.R., Thiery, R.G., Schuller, R.M., Suloway, J.J., Coal fly ash: a review of the literature and proposed classification system with emphasis on environmental impacts, *Environmental geology notes 96, Illinois State Geological Survey*, Champaign, **1981**.
- [55] Tolle, D.A., Arthur, M.F., Pomeroy, S.E., Fly ash use for agriculture and land reclamation: a critical literature review and identification of additional research needs, *Battelle Columbus Laboratories*, RP-1224-5, Columbus, Ohio, **1982**.



- [56] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğınobalı, A., Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği*, Ankara, **2009**.
- [57] Tanosaki, T., Matsumoto, M., Nozaki, K., Izumi, K., Nakamura, K., Nambu, M., Maruta, T., Characterization of Incineration Ashes in Japan, *Journal of Research of the Chichibu Onoda Cement Corporation*, 49, 145-154, **1998**.
- [58] Soltys, P.A., David, F.S.N., Mauney, T., Surface area and porosity of coal fly ash, *Environmental Science Technology*, 19, 82-86, **1985**.
- [59] Çana, B., Güleç, N., Eler, A., Kömür Yakıtlı Termik Santrallerdeki Uçucu Küllerin Çevreye Etkisi, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi 20. Yıl Jeoloji Sempozyumu*, Konya, **1997**.
- [60] Anonim, Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri, *E.İ.E Genel Yayın Direktörlüğü*, Ankara, **1979**.
- [61] TS EN 450, Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, **1998**.
- [62] Tokyay, M., Hubbard, F.H., Mineralogical Investigations of High-Lime Fly Ashes, *Proceedings Of Fourth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1, 65-78, İstanbul, **1992**.
- [63] United States Environmental Protection Agency, Wastes from the Combustion of Coal by Electric Utility Power Plants, EPA 530-SW-88-002, Washington, DC, **1988**.
- [64] Kumar, A.A., Santhi, A.S., Ganesh, M.G., Various Utilization of Fly Ash and its Properties on Concrete-A Review, *International Journal of Emerging trends in Engineering and Development*, 2, 435-444, **2012**.
- [65] Nawaz, I., Disposal and Utilization of Fly Ash to Protect the Environment, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 5259-5266, **2013**.
- [66] Gürü, M., Tekeli, S., Akın, E., Manufacturing of Polymer Matrix Composite Material Using Marble Dust and Fly Ash, *Key Engineering Materials*, 336-338, 1353-1356, **2007**.
- [67] Kristovich, R.L., Dutta, P.K., Nitration of Benzo pyrene Adsorbed on Coal Fly Ash Particles by Nitrogen Dioxide: Role of Thermal Activation, *Environmental Science Technology*, 39, 6971-6977, **2005**.
- [68] Özyurt, Z., *Termik Santral Atıklarındaki İz Elementlerin Çevresel Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, **2006**.

- [69] Doğan, Ö., *Afşin/Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinden Çöktürölmüş Kalsiyum Karbonat (CaCO<sub>3</sub>) Kazanım Koşullarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, **2007**.
- [70] Ünsal, N., *İnşaat Mühendisleri İçin Jeoloji*, Genişletilmiş 3.Basım, Nobel Yayıncılık, 294 s., **2015**.
- [71] Önem, Y., *Sanayi Madenleri (Tanımları, Doğada Bulunuşları, Dünya ve Türkiye Rezervleri, Yıllık Üretimleri ile İhraç ve İthal Miktarları)*, 368 s., Ankara, **1997**.
- [72] DPT, *Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Alçı-Kireç-Kum-Çakıl-Mıcır-Boya Toprakları-Tuğla-Kiremit*, *Çalışma Grubu Raporu*, DPT:2615, ÖİK:626, Ankara, **2001**.
- [73] Boynton, R.S., *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*, 578 p., **1966**.
- [74] Parlakyıldız, M., *Hammadde Olarak Kireçtaşı ve Üretilen Kirecin Standartlara Uygunluğunun Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, **2008**.
- [75] Temur, S., *Endüstriyel Hammaddeler*, 310 s., Konya, **2001**.
- [76] Kırıköğlü, M.S., *Endüstriyel Kullanım Açısından Karbonat Kayaçları. I.Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul, **1996**.
- [77] Lokman, L., *Kireç*, KÜB Yayınları, 1-2, **2000**.
- [78] Lokman, L., *Kireç El Kitabı*, Kireç Üreticileri Birliği, 282 s., Ankara (Basılmamış), **1999**.
- [79] Konak, G., Onur, H.A., Karakuş, D., *İnşaat Sektörünün İhtiyacı Olan Agreganın İşletilmesi ve Kentsel Faydaları*, *TMMOB İzmir Kent Sempozyumu*, 232-251, İzmir, **2008**.
- [80] DPT, *Toprak Sanayi Hammaddeleri, Kalkınma Planı, Madencilik ÖİK, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu*, Rapor No: 2612, Ankara, **2001a**.
- [81] Sümer, O., Sağlık, A., Ozmak, M., Ünal, Ü., Kavuklu, Ö., Pektaş, Ç.T., *Çimento ve Deneyleri*, DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, **2013**.
- [82] Blezard, R.G., *The history of calcareous cements*, in P.C. Hewlett (ed.) *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, London: Arnold, 6-23, **1998**.
- [83] Kocabeyler, M.F., Tunç, E., Sağlık, A., *Beton Eğitim Kitabı*, DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, **2010**.
- [84] Şimşek, O., *Yapı Malzemesi II*, Beta Basım A.Ş., İstanbul, **2003**.
- [85] Sağlık, A., Tunç, E., Kocabeyler, M.F., *Beton ve Özellikleri*, DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı, Ankara, **2013**.

- [86] Erdoğan, T.Y., *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., 741 s., Ankara, **2003**.
- [87] Yeğinobalı, A., Çimentoda Yeni Standardlar ve Mineral Katkılar, *TMH-Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, **2003**.
- [88] TS EN 197-1, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, **2012**.
- [89] Şimşek, O., *Beton ve Beton Teknolojisi*, Seçkin Yayıncılık A.Ş., Ankara, **2016**.
- [90] Topçu, A., Betonarme I, [http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index\\_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme\\_1\\_1.pdf](http://mmf2.ogu.edu.tr/atopcu/index_dosyalar/Dersler/Betonarme1/Sunular/Betonarme_1_1.pdf) (Mart, **2017**).
- [91] Gani, M.S.J., *Cement and Concrete*, Chapman & Hall, London, **1997**.
- [92] Alp, S., İstanbul Ticaret Odası Kum, Kil ve Taşocakları Sektör Raporu, Mayıs, **2004**.
- [93] Mindness, S., Young, J., *Concrete*, Prentice-Hall Inc., 671 p., New Jersey, USA, **1981**.
- [94] Güner, M.S., Süme, V., *Yapı Malzemesi ve Beton*, Erzurum, Ağustos, **2000**.
- [95] Neville, A.M., *Properties Of Concrete*, Third Edition, Longman Scientific and Technical, **1981**.
- [96] Postacıoğlu, B., *Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton*, Cilt 2, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, **1987**.
- [97] Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., Uyan, M., Meslek Liseleri için Her Yönüyle Beton, *Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını*, İstanbul, **1999**.
- [98] Yalçın, H., Gürü, M., *Çimento ve Beton*, Palme Yayıncılık A.Ş., Ankara, **2006**.
- [99] T.S.E., Beton Agregaları, TS 706 EN 12620+A1, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, **2009**.
- [100] Erdoğan, T.Y., *Betonu Oluşturan Malzemeler-Agregalar*, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul, **1995**.
- [101] Hansen, W.C., Basic Chemistry of Reactions of Aggregates in Portland Cement Concrete, *Journal of Materials*, 2, **1967**.
- [102] Bloem, D.L., Gaynor, R.D., Effects of Aggregate Properties on Strength of Concrete, *Journal of American Concrete Institute*, 60, 1429-1456, **1963**.
- [103] Deli, A., Orhan, H., Alacaatlı-Beytepe Köyü (GB Ankara) Bölgesinde Yüzeyleyen Jura-Kretase Yaşlı Çökellerin Stratigrafiği, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22, 61-80, **2007**.

- [104] Bingöl, E., Akyürek, B., Korkmazer, B., Biga Yarımadasının jeolojisi ve Karakaya formasyonunun bazı özellikleri, *Cumhuriyetin 50. Yılı Yerbilimleri Kongresi, Tebligler, MTA*, 70-77, Ankara, **1973**.
- [105] Batman, B., Kulaksız, S., Görmüş, S., Alacaatlı Yöresinde (GB-Ankara) Jura Kretase Yaşlı İstifin Deformasyon Özelliklerine İlişkin Bir İnceleme: *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Dergisi*, 4, 135-153, **1978**.
- [106] Altınar, D., Koçyiğit, A., Kuzeybatı Anadolu güneyinin Jura-Erken Kretase'deki Paleocoğrafik evrimi, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 1-9, **1993**.
- [107] Okay, A.İ., Siyako, M., Burkan, K.A., Biga Yarımadası'nın Jeolojisi ve Tektonik Evrimi, *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Bülteni*, 2, 83-121, **1990**.
- [108] Koçyiğit, A., First Remarks On The Geology Of The Karakaya Basin: Karakaya Orogen and Pre-Jurassic Nappes in Eastern Pontids, Turkey: *Geologica Romana*, 27, 3-11, **1991**.
- [109] Okay, A.İ., Göncüoğlu, M.C., The Karakaya Complex: A Review of Data and Concepts, *Turkish Journal of Earth Sciences*, 13, 77-95, **2004**.
- [110] Leven, E. JA., Lower Permian fusulinids from the vicinity of Ankara (Turkey), *Rivista Italiana Paleontologia e Stratigrafia*, 101, 235-248, **1995**.
- [111] Erdoğan, T.Y., Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Çimentolar, Agregalar, Su., *Türkiye Hazır Beton Birliği*, Ankara, **2004**.
- [112] ISRM, *The Complete ISRM Suggested Methods for Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*, Ulusay, R., Hudson, J.A., (eds.), Suggested Methods prepared by the ISRM Commission on Testing Methods, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, 628 p., **2007**.
- [113] Turhan, S., Parmaksız, A., Köse, A., Yüksel, A., Arıkan, I.H., Yücel, B., Radiological Characteristics of Pulverized Fly Ashes Produced in Turkish Coal-Burning Thermal Power Plants, *Fuel*, 89, 3892-3900, **2010**.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Kenan ZORLU

Doğum Yeri : Keçiören/Ankara

Medeni Hali : Bekâr

E-posta : kenanzorlu@hacettepe.edu.tr / zorlukenan@gmail.com

Adresi : Kamil Ocak Mahallesi Devrek Sokak Köşk Apartmanı No. 14/1,  
06010, Keçiören, Ankara

### Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2010-2014)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2014-2017)

### Yabancı Dil

İngilizce (İyi)

### İş Deneyimi

### Deneyim Alanları

Doğal yapı malzemeleri, Agregalar, Mühendislik jeolojisi

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

### Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 21/06/2017

Tez Başlığı / Konusu: UÇUCU KÜLLERDEN SOĞUK BAĞLAMA YÖNTEMİYLE HAFİF-İRİ AGREGA ÜRETİMİ VE ATMOSFERİK ETKİLER ALTINDA PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 116 sayfalık kısmına ilişkin, 21/06/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6 'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza  
21-06-2017  
Kenan Zorlu

Adı Soyadı: KENAN ZORLU  
Öğrenci No: N14229301  
Anabilim Dalı: JEOLJİ MÜHENDİSLİĞİ  
Programı: YÜKSEK LİSANS  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Adil BİNAL

## **EKLER**

**EK-1** Uçucu kül agregasına ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

**EK-2** Kireçtaşı agregasına ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

**EK-3** Uçucu kül agregası ve kireçtaşı agregasına ait hesaplanan nokta yükü dayanım parametreleri

**EK-4** Taze beton numunelerine ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

**EK-5** Donma-çözülme deneyine ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

**EK-6** Islanma-kuruma deneyine ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

**EK-7** Dış ortam deneyine ait hesaplanan fiziko-mekanik parametreler

## EK-1

### UÇUCU KÜL AGREGASI

Örnek no	M <sub>d</sub> (g)	M <sub>w</sub> (g)	Taşan civa ağırlığı (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>dry</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>sat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	As (%)
1	8,57	9,36	63,03	4,63	1,85	2,02	17,05	9,22
2	8,45	9,48	64,02	4,71	1,80	2,01	21,88	12,19
3	9,99	11,21	72,84	5,36	1,87	2,09	22,78	12,21
4	8,97	10,00	67,82	4,99	1,80	2,01	20,65	11,48
5	8,61	9,57	65,04	4,78	1,80	2,00	20,07	11,15
6	8,69	9,61	69,87	5,14	1,69	1,87	17,91	10,59
7	8,76	9,59	63,47	4,67	1,88	2,05	17,78	9,47
8	8,78	9,98	68,44	5,03	1,74	1,98	23,85	13,67
9	9,22	10,16	69,21	5,09	1,81	2,00	18,47	10,20
10	9,03	10,06	66,01	4,85	1,86	2,07	21,22	11,41
11	8,94	9,87	61,88	4,55	1,96	2,17	20,44	10,40
12	8,46	9,36	61,83	4,55	1,86	2,06	19,80	10,64
13	8,52	9,42	62,33	4,58	1,86	2,06	19,64	10,56
14	8,81	9,64	65,03	4,78	1,84	2,02	17,36	9,42
15	8,54	9,49	64,89	4,77	1,79	1,99	19,91	11,12
16	8,58	9,52	64,21	4,72	1,82	2,02	19,91	10,96
<b>Ortalama*</b>					<b>1,83*</b>	<b>2,03*</b>	<b>19,92*</b>	<b>10,92*</b>



## EK-2

### KİREÇTAŞI AGREGASI

Örnek no	M <sub>d</sub> (g)	M <sub>w</sub> (g)	Taşan civa ağırlığı (g)	V (cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>dry</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>sat</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	As (%)
1	4,75	4,77	23,67	1,74	2,73	2,74	1,15	0,42
2	6,59	6,59	32,87	2,42	2,73	2,73	0,00	0,00
3	8,64	8,64	43,88	3,23	2,68	2,68	0,00	0,00
4	4,97	4,97	25,74	1,89	2,63	2,63	0,00	0,00
5	7,00	7,00	35,13	2,58	2,71	2,71	0,00	0,00
6	3,25	3,26	16,68	1,23	2,65	2,66	0,82	0,31
7	6,15	6,16	30,77	2,26	2,72	2,72	0,44	0,16
8	5,38	5,38	26,83	1,97	2,73	2,73	0,00	0,00
<b>Ortalama*</b>					<b>2,69*</b>	<b>2,70*</b>	<b>0,30*</b>	<b>0,11*</b>

### EK-3

#### UÇUCU KÜL AGREGASI

Örnek no	kg	D	D <sub>e</sub>	I <sub>s</sub>	F	I <sub>s(50)</sub>
1	126	18	324	3,82	2,32	8,85
2	92,5	18	324	2,80	2,32	6,49
3	79	18	324	2,39	2,32	5,55
4	63	18	324	1,91	2,32	4,42
5	56,5	18	324	1,71	2,32	3,97
6	45	18	324	1,36	2,32	3,16
7	42,5	18	324	1,29	2,32	2,98
8	28,5	18	324	0,86	2,32	2,00
9	25	18	324	0,76	2,32	1,75
10	23,5	18	324	0,71	2,32	1,65
11	21	18	324	0,64	2,32	1,47
12	18	18	324	0,55	2,32	1,26
<b>Ortalama*</b>	<b>83,4*</b>	<b>18*</b>		<b>2,5*</b>		<b>5,9*</b>

#### KİREÇTAŞI AGREGASI

Örnek no	kg	D	W	A	D <sub>e</sub> <sup>2</sup>	I <sub>s</sub>	F	I <sub>s(50)</sub>
1	167	11	27,5	302,5	385,15	4,25	2,51	10,66
2	155,5	14	35	490	623,89	2,45	3,11	7,61
3	111,5	10	25	250	318,31	3,44	2,30	7,90
4	111,5	14	35	490	623,89	1,75	3,11	5,46
5	109,5	10	25	250	318,31	3,37	2,30	7,76
6	98	12	30	360	458,37	2,10	2,71	5,68
7	79,5	10	25	250	318,31	2,45	2,30	5,64
8	76,5	10	25	250	318,31	2,36	2,30	5,42
9	71	14	35	490	623,89	1,12	3,11	3,48
10	69	9	22,5	202,5	257,83	2,63	2,09	5,49
11	67	10	25	250	318,31	2,06	2,30	4,75
12	64,5	10	25	250	318,31	1,99	2,30	4,57
13	55,5	11	27,5	302,5	385,15	1,41	2,51	3,54
14	49,5	9	22,5	202,5	257,83	1,88	2,09	3,94
15	46	9	22,5	202,5	257,83	1,75	2,09	3,66
<b>Ortalama*</b>	<b>113,6*</b>	<b>10,9*</b>				<b>2,3*</b>		<b>5,7*</b>

## EK-4

Örnek No	Beton Numune Tanımı	Çevrim Sayısı	$\rho_{\text{sat}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{\text{dry}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	As (%)	$P_{\text{dalga}}$ hızı (m/s)	UCS (MPa)
UÇKAB19	Uçucu Kül Agregalı Beton	0	2,29	2,27	2,54	1,12	4576,7	54,26
UÇKAB20	Uçucu Kül Agregalı Beton	0	2,30	2,28	2,26	0,99	4599,4	52,60
UÇKAB21	Uçucu Kül Agregalı Beton	0	2,30	2,28	2,17	0,95	4631,9	54,01
<b>Ortalama*</b>			<b>2,30*</b>	<b>2,27*</b>	<b>2,32*</b>	<b>1,02*</b>	<b>4602,7*</b>	<b>53,62*</b>
KAB22	Kireçtaşı Agregalı Beton	0	2,34	2,31	3,79	1,64	4670,9	41,88
KAB23	Kireçtaşı Agregalı Beton	0	2,32	2,29	3,12	1,36	4573,3	43,81
KAB24	Kireçtaşı Agregalı Beton	0	2,32	2,29	3,13	1,37	4604,3	46,96
<b>Ortalama*</b>			<b>2,33*</b>	<b>2,30*</b>	<b>3,34*</b>	<b>1,46*</b>	<b>4616,2*</b>	<b>44,22*</b>

## EK-5

<b>Çevrim Sayısı</b>	<b><math>\rho_{\text{sat}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{\text{dry}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>n (%)</b>	<b>As (%)</b>	<b>P<sub>dalga</sub> hızı (m/s)</b>	<b>UCS (MPa)</b>
0	2,28	2,25	2,11	0,94	4599,4	54,26
0	2,29	2,27	2,23	0,98	4645,2	52,60
0	2,30	2,28	2,26	0,99	4642,2	54,01
0	2,30	2,27	2,43	1,07	4644,3	54,26
0	2,30	2,28	2,59	1,14	4563,6	52,60
0	2,29	2,27	2,55	1,12	4639,1	54,01
22	2,27	2,26	1,07	0,47	4627,6	46,00
22	2,29	2,27	1,48	0,65	4747,5	46,49
22	2,30	2,28	1,36	0,60	4642,2	48,52
44	2,29	2,28	0,81	0,35	4687,6	52,16
44	2,29	2,28	0,97	0,42	4677,0	56,63
44	2,28	2,28	0,82	0,36	4667,8	54,76

**EK-6**

<b>Çevrim Sayısı</b>	<b><math>\rho_{\text{sat}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{\text{dry}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>n (%)</b>	<b>As (%)</b>	<b>P<sub>dalga</sub> hızı (m/s)</b>	<b>UCS (MPa)</b>
0	2,29	2,26	2,73	1,21	4579,9	54,26
0	2,30	2,27	2,46	1,08	4643,7	52,60
0	2,30	2,28	2,10	0,92	4599,4	54,01
0	2,30	2,28	2,58	1,13	4518,9	54,26
0	2,30	2,27	2,64	1,19	4559,5	52,60
0	2,30	2,28	1,97	0,86	4626,7	54,01
40	2,28	2,27	1,08	0,48	4708,8	57,18
40	2,28	2,27	1,09	0,48	4745,9	62,48
40	2,29	2,28	1,07	0,47	4774,1	56,93
80	2,28	2,27	0,71	0,31	4716,6	56,81
80	2,28	2,27	0,68	0,30	4716,3	56,44
80	2,28	2,28	0,63	0,28	4773,1	56,40

**EK-7**

	<b>Çevrim Sayısı</b>	<b><math>\rho_{\text{sat}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\rho_{\text{dry}}</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>n (%)</b>	<b>As (%)</b>	<b>P<sub>dalga</sub> hızı (m/s)</b>	<b>UCS (MPa)</b>
UÇKAB1	0	2,30	2,28	1,65	0,72	4627,6	54,26
UÇKAB3	0	2,28	2,26	3,29	1,45	4654,0	52,60
UÇKAB4	0	2,29	2,27	3,38	1,49	4639,1	54,01
UÇKAB1	270	2,30	2,26	1,20	0,53	4699,7	52,35
UÇKAB3	270	2,31	2,27	1,67	0,74	4741,8	60,10
UÇKAB4	270	2,29	2,26	2,23	0,98	4741,2	57,96
KAB2	0	2,28	2,26	1,21	0,54	4598,2	41,88
KAB5	0	2,31	2,27	3,57	1,57	4650,9	43,81
KAB6	0	2,29	2,26	3,12	1,38	4646,9	46,96
KAB2	270	2,27	2,24	2,42	1,08	4713,1	58,85
KAB5	270	2,30	2,28	2,49	1,09	4723,8	56,86
KAB6	270	2,28	2,26	2,17	0,96	4690,3	62,76