



**T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SUGÖZÜ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN  
DAYANIM ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Bekir Can DELİKURT**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
AĞUSTOS-2014**



**T.C.**  
**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SUGÖZÜ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN**  
**DAYANIM ve GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**Bekir Can DELİKURT**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**AĞUSTOS-2014**

T.C.  
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SUGÖZÜ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN DAYANIM ve  
GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**BEKİR CAN DELİKURT**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM** danışmanlığında hazırlanan bu tez **12/08/2014** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM  
Başkan

Doç. Dr. Erdoğan ÖZBAY  
Üye

Doç. Dr. Yakup KAR  
Üye

**Kod No:**

**Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN**  
**Enstitü Müdürü**

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

**12/08/2014**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Bekir Can DELİKURT**

## ÖZET

### SUGÖZÜ TERMİK SANTRALİ UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN DAYANIM VE GEÇİRİMLİLİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Bu çalışmada, Yumurtalık/Adana Sugözü termik santralinde atık olarak meydana gelen uçucu külün betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Beton numuneler basınç, eğilmede çekme, su emme, yüksek sıcaklık dayanımı, ultrasonik ses, kılcal su emme, aşınma, yarmada çekme dayanımı, su geçirgenliği, gaz geçirgenliği özellikleri açısından değerlendirilmiştir. Bağlayıcı madde dozajı  $400 \text{ kg/m}^3$  tür. Karışımların su/bağlayıcı oranı 0.45' de sabit tutulmuştur. Her karışımın çökme değeri  $15 \pm 2$  cm olacak şekilde akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlar %0, %10, %20, %30, %40 oranlarında F sınıfı uçucu kül çimento ile yer değiştirilerek hazırlanmıştır. Deneysel çalışma sonuçları, uçucu külün ağırlıkça %10-20 oranında çimento yerine kullanılması ile betonun basınç, eğilmede çekme, aşınma, yarmada çekme, yüksek sıcaklık dayanım değerlerinin yükseldiğini göstermiştir. Aynı zamanda su emme ve kapiler geçirgenlikleri azalmıştır. Sugözü uçucu külünün betonda mineral katkı madde olarak kullanılmasının teknik, ekonomik ve çevresel faydalar getireceği düşünülmektedir.

2014, 83 sayfa

**Anahtar kelimeler:** Beton, Uçucu kül, Dayanım, Dayanıklılık, Sugözü

## **ABSTRACT**

### **SUGÖZÜ THERMAL POWER PLANT FLY ASH CONCRETE DURABILITY AND PERMEABILITY PROPERTIES EFFECTS**

In this study, usability of fly ash, which is waste product of Yumurtalık/Adana Sugözü thermal powerplant as a mineral additive in concrete is investigated. Compressive, bending, water absorption, which than resistance, ultrasonic pulse volume, capillary, abrasion, split tensile strength, water permeability and gas permeability properties of concrete are evaluated. Binder dosage is 400 kg for one cubic meter. Water/binder ratio of mixtures is taken constant as 0.45. Superplant is used to keep constant slump value of  $15\pm 2$  cm. Mixtures are prepared by replacing Fclass fly ash with ratio of %0, %10, %20, %30, %40. Experimental study results showed that strength of concrete specimens increased by substituting fly ash with cement by weight of %10 to %20. At the time water absorption and capillar permeability are decreased. It is thought that the use of Sugözü fly ash as cementitious material in concrete has technical, economical and benefits.

2014, 83 pages

**Keywords:** Concrete, FlyAsh, Strength, Durability, Sugözü

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez programımın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön vererek yardım ve bilgi konusunda bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, sayın Doç. Dr. Umur Korkut SEVİM'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Tez ve laboratuvar çalışmalarımda yardımcı olan Öğretim elemanı sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan Tacettin TÜRKER, sayın Doç. Dr. Erdoğan ÖZBAY ve Arş. Gör. Müzeyyen BALÇIKANLI' ya, yüksek lisans öğrencisi Şahin BANKİR' e teşekkür ederim.

Desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem Solmaz DELİKURT'a, babam Ali Rıza DELİKURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                         |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                                              | I    |
| ABSTRACT .....                                                                          | II   |
| TEŞEKKÜR .....                                                                          | III  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                       | IV   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                                                   | VI   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                 | VII  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                    | VIII |
| 1. GİRİŞ .....                                                                          | 1    |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                                              | 4    |
| 2.1. Uçucu Küllü Betonlar .....                                                         | 4    |
| 2.2. Sugözü Termik Santrali Uçucu Külünün Betonda Kullanımı İle İlgili Çalışmalar ..... | 15   |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM .....                                                             | 18   |
| 3.1 Materyal .....                                                                      | 18   |
| 3.2 Uçucu Küller .....                                                                  | 18   |
| 3.2.1. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları .....                                           | 19   |
| 3.2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....                                           | 20   |
| 3.2.3. Uçucu Küllerin Kimyasal, Mineralojik, Morfolojik Yapıları ve Özellikleri .....   | 21   |
| 3.2.4. Kimyasal Oksitlerin Uçucu Kül Özelliklerine Etkileri .....                       | 23   |
| 3.2.5. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri .....                                        | 24   |
| 3.2.6. Uçucu Küller İkame Metotları .....                                               | 26   |
| 3.3 Uçucu Küllerin Beton Özellikleri Üzerine Etkileri .....                             | 27   |
| 3.3.1. Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik .....                                              | 27   |
| 3.3.2. Priz Süresi, Hidratasyon Isısı ve Kanama .....                                   | 28   |
| 3.3.3. Dayanım .....                                                                    | 29   |
| 3.3.4. Dayanıklılık .....                                                               | 29   |
| 3.3.5. Ekonomi .....                                                                    | 30   |
| 3.4 Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler .....                                            | 31   |
| 3.4.1. Çimento Üretimi .....                                                            | 31   |
| 3.4.2. Beton Üretimi .....                                                              | 32   |
| 3.4.3. Tuğla ve Hafif Agrega Üretimi .....                                              | 32   |
| 3.4.4. Boşluklu Beton (Gaz Beton ) Üretimi .....                                        | 32   |
| 3.4.5. Yol, Zemin ve Baraj Uygulamalarında .....                                        | 33   |
| 3.5 Yöntem .....                                                                        | 33   |
| 3.6. Deneysel Çalışmalar .....                                                          | 34   |
| 3.6.1. Basınç Dayanımı Deneyi .....                                                     | 34   |
| 3.6.2. Elastisite Modülü Tayini .....                                                   | 35   |
| 3.6.3. Eğilme (Eğilmede Çekme) Dayanımı Deneyi .....                                    | 36   |
| 3.6.4. Su Emme Oranları Tayini Deneyi .....                                             | 37   |
| 3.6.5. Kapiler Su Emme Katsayısı Tayini Deneyi .....                                    | 38   |
| 3.6.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi .....                                              | 39   |
| 3.6.7. Aşınma Deneyi .....                                                              | 41   |
| 3.6.8. Ultrasonik Ses Deneyi .....                                                      | 42   |
| 3.6.9. Basınçlı Su Geçirgenlik Deneyi .....                                             | 44   |



|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.6.10. Yarma (Yarmada Çekme) Dayanımı Deneyi.....                           | 46 |
| 3.6.11. Gaz Geçirimsizlik Deneyi .....                                       | 48 |
| 3.7. Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Malzemeler ve Özellikleri .....      | 50 |
| 3.7.1. Çimento.....                                                          | 50 |
| 3.7.2. Uçucu Kül .....                                                       | 51 |
| 3.7.3. Su .....                                                              | 53 |
| 3.7.4. Akışkanlaştırıcı ve Özellikleri .....                                 | 53 |
| 3.7.5. Agraga.....                                                           | 53 |
| 3.8. Hazırlanacak Numune Tipleri.....                                        | 54 |
| 3.9. Beton Karışım Oranları.....                                             | 55 |
| 3.10. Beton Üretimi ve Kürü .....                                            | 55 |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....                                     | 57 |
| 4.1. Sertleşmiş Beton Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları ..... | 57 |
| 4.1.1. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları .....                                 | 57 |
| 4.1.2. Elastisite Modülü Değerleri .....                                     | 59 |
| 4.1.3. Eğilme (Eğilmede Çekme) Dayanımı Deney Sonuçları .....                | 60 |
| 4.1.4. Su Emme Oranı Tayini Deney Sonuçları.....                             | 63 |
| 4.1.5. Kapiler Su Emme Katsayısı Deney Sonuçları .....                       | 64 |
| 4.1.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deney Sonuçları .....                          | 65 |
| 4.1.7. Aşınma Dayanımı Deney Sonuçları.....                                  | 67 |
| 4.1.8. Ultrasonik Ses Deney Sonuçları .....                                  | 69 |
| 4.1.9. Basınçlı Su Geçirgenlik Deney Sonuçları.....                          | 70 |
| 4.1.10. Yarma (Yarmada Çekme) Dayanımı Deney Sonuçları.....                  | 72 |
| 4.1.11. Gaz Geçirimsizlik Deney Sonuçları.....                               | 73 |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....                                                    | 75 |
| 5.1. Sonuç .....                                                             | 75 |
| 5.2. Öneriler .....                                                          | 76 |
| KAYNAKLAR .....                                                              | 78 |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                               | 83 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                                        |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1.  | Basınç deneyi .....                                                                                    | 34 |
| Şekil 3.2.  | Beton basınç deneyi düzeneği.....                                                                      | 35 |
| Şekil 3.3.  | Eğilme deneyi .....                                                                                    | 36 |
| Şekil 3.4.  | Eğilme dayanımı deneyi düzeneği.....                                                                   | 37 |
| Şekil 3.5.  | Kapilarite katsayısı deneyi düzeneği .....                                                             | 38 |
| Şekil 3.6.  | Sıcaklık etkisi deneyi düzeneği.....                                                                   | 39 |
| Şekil 3.7.  | Aşınma dayanımı deney düzeneği .....                                                                   | 41 |
| Şekil 3.8.  | Ultrasonik ses deneyi düzeneği.....                                                                    | 42 |
| Şekil 3.9.  | Basınçlı su geçirgenliği deney düzeneği.....                                                           | 44 |
| Şekil 3.10. | Basınçlı su geçirgenliği deneyi su işleme derinliği ölçülmesi .....                                    | 45 |
| Şekil 3.11. | Küp yarma deneyi .....                                                                                 | 46 |
| Şekil 3.12. | Yarma dayanımı deney düzeneği.....                                                                     | 47 |
| Şekil 3.13. | Beton gaz geçirgenlik tayini deney düzeneği .....                                                      | 48 |
| Şekil 3.14. | Gaz geçirgenlik debisi hesap düzeneği .....                                                            | 49 |
| Şekil 3.15. | Agreganın granülometri eğrisi .....                                                                    | 54 |
| Şekil 3.16. | Taze beton karıştırma prosedürü.....                                                                   | 56 |
| Şekil 4.1.  | 28-90-180 günlük basınç deneyi sonuçları .....                                                         | 58 |
| Şekil 4.2.  | Şahit, Uçucu kül %10, 20,30,40 oranlarında eğilmede çekme maksimum yük-birim deformasyon grafiği ..... | 61 |
| Şekil 4.3.  | Basınç ve çekme dayanımı değerleri karşılaştırılması.....                                              | 63 |
| Şekil 4.4.  | Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım kayıpları .....                                               | 66 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. Uçucu kül sınıfları .....                                                    | 20 |
| Çizelge 3.2. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri .....                                    | 22 |
| Çizelge 3.3. Uçucu küller için fiziksel ve kimyasal standart sınırlar.....                | 26 |
| Çizelge 3.4. Uçucu küllerin beton üzerindeki etkileri .....                               | 31 |
| Çizelge 3.5. Sertleşmiş beton deneyleri .....                                             | 34 |
| Çizelge 3.6. Sıcaklığın artışının beton üzerinde oluşturduğu etkiler .....                | 40 |
| Çizelge 3.7. Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi .....         | 44 |
| Çizelge 3.8.. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri .....                           | 51 |
| Çizelge 3.9. Uçucu külün kimyasal özellikleri .....                                       | 52 |
| Çizelge 3.10. Akışkanlaştırıcı madde özellikleri .....                                    | 53 |
| Çizelge 3.11. Karışık agrega granülometrisi ve TS 706 standart sınırları .....            | 54 |
| Çizelge 3.12. m <sup>3</sup> beton için malzeme miktarları .....                          | 55 |
| Çizelge 4.1. Beton basınç dayanımı deney sonuçları.....                                   | 57 |
| Çizelge 4.2. Elastisite modülü değerleri .....                                            | 59 |
| Çizelge 4.3. TS 500' göre elastisite modülü değeri standardı .....                        | 60 |
| Çizelge 4.4. Eğilme dayanımı uygulanan numunelerde kuvvet ve deplasman<br>değerleri ..... | 61 |
| Çizelge 4.5. Eğilme (eğilmede çekme) dayanımı deneyi sonuçları.....                       | 62 |
| Çizelge 4.6. Su emme deneyi sonuçları .....                                               | 64 |
| Çizelge 4.7. Kapilerite katsayısı deneyi sonuçları .....                                  | 65 |
| Çizelge 4.8. Yüksek Sıcaklık etkisi deneyi sonuçları .....                                | 66 |
| Çizelge 4.9. Sıcaklık artışının beton üzerinde oluşturduğu etkiler .....                  | 67 |
| Çizelge 4.10. Aşınma deneyi oyuk derinliği deneyi sonuçları.....                          | 68 |
| Çizelge 4.11. Aşınma derinliği ağırlık kayıpları deneyi sonuçları.....                    | 68 |
| Çizelge 4.12. Ultrasonik ses deneyi sonuçları .....                                       | 70 |
| Çizelge 4.13. Ultrasonik ses deneyi referans aralıkları.....                              | 70 |
| Çizelge 4.14. Basınçlı su işleme derinlikleri deneyi sonuçları .....                      | 71 |
| Çizelge 4.15. Su emme ve kapilerite katsayısı değerleri .....                             | 71 |
| Çizelge 4.16. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları .....                                | 73 |
| Çizelge 4.17. Gaz geçirimlilik katsayısı sonuçları.....                                   | 74 |

## **SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ**

### **SİMGELER**

|                |                                   |
|----------------|-----------------------------------|
| A              | : Kesit alanı                     |
| B              | : Numune kesitinin kenar uzunluğu |
| D              | : Numune kesitinin yüksekliği     |
| L              | : Sabit mesnetler arası uzaklık   |
| P              | : Uygulanan kuvvet                |
| P <sub>a</sub> | : Atmosfer basıncı                |
| T              | : Geçen zaman                     |
| $\sigma_{ct}$  | : Maksimum çekme gerilmesi        |
| $\sigma_{cc}$  | : Maksimum basınç gerilmesi       |

### **KISALTMALAR**

|      |                  |
|------|------------------|
| E.K. | : Erimez kalıntı |
| K.K. | : Kızdırma kaybı |
| Ö.A. | : Özgöl ağırlık  |
| Ö.Y. | : Özgöl yüzey    |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde beton üretiminde, hem maliyeti azaltmak hem de yüksek performans elde etmek amacıyla birçok araştırma yapılmaktadır. Çağımızda hızlı bir endüstrileşme ile birlikte malzeme ve enerji tasarrufuna verilen değer de artmaktadır. Bununla birlikte atık olarak doğaya terk edilen ve doğanın daha çok kirlenmesine neden olan birçok yan ürün oluşmaktadır. Bu ürünlerin birçoğunun malzeme özellikleri açısından inşaat sektöründe değerlendirilebileceği yapılan araştırmalar sonucunda belirlenmiştir. Mevcut malzemelerin geliştirilmesi ve elde edilen bu atıl malzemelerin değerlendirilmesi, bir yandan ekonomi sağlamakta diğer yandan da çevreye verilen zararı azaltmaktadır.

Ülkemizde enerji üretiminin yarısından fazlası kömür veya linyit ile çalışan termik santrallerden karşılanmaktadır. Bu üretim sonucunda elde edilen elektrik enerjisi ile birlikte atık yan ürünler olarak ortaya uçucu kül adı verilen çok ince taneler çıkmaktadır. Ancak, bunlar ya kuru olarak atık depolarına atılmakta ya da suyla karıştırmak suretiyle kül barajlarına pompalanmaktadır. Dünyadaki uçucu kül üretimi yıllık yaklaşık 600 milyon ton Türkiye de ise yıllık yaklaşık 15 milyon tondur (TÇMB, 2004), ancak uçucu kül özellikleri hakkındaki yetersiz bilgi ve uçucu kül özelliklerinin her zaman üniform olmamasından ötürü beton endüstrisinde kullanımı oldukça düşüktür. Yine de, kimyasal kompozisyonu itibarıyla betonun ana bağlayıcısı olan Portland çimentosuna oldukça benzeyen ve puzolanik özelliğe sahip olan uçucu küllerin, inşaat sektöründe çimento ve hazır betonda daha fazla kullanılması yönünde artan bir eğilim bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, uçucu küllerin çimento ve betonda kullanımının sağlanacağı yararlar, klinkerizasyon, öğütme, kurutma enerjilerinde tasarruf, ürün çeşitliliği, elde edilebilecek üstün özellikler ile maliyet üretici ve kullanıcı açısından ve çevresel bakımından yararlı olacaktır (Karahan, 2006).

Puzolan kelimesi, maddenin bulunduğu Pozzuoli isimli İtalyan kasabasından gelir. Bu konuda ilk patent İngiliz James Parker'e 1796' da verilmiştir. 1824' te de İngiliz duvarcısı Joseph Aspdin kireç taşıyı kille yakarak bir bağlayıcı madde olan çimentoyu elde etti. İngiltere'nin Portland Adasından getirilen kireç taşına benzediği için Portland çimentosu ismini verdi. Bugün günümüzde kullanılan modern portland

çimentosu Aspdin' in çalışmasının geliştirilmiştir. Betonun teşkil eden en önemli madde, bağlayıcı olan çimentodur. Çimento su ile kimyasal reaksiyona girerek agrega tanelerini bağlar. Agrega, betonun yaklaşık % 75 'ini meydana getirir. Tane boyutlarına bağlı olarak iri ve ince diye isimlendirilir. İri veya kaba agrega çoğu zaman taş ocaklarından kırma suretiyle elde edilebildiği gibi tabii olarak da bulunabilir. Dikkat edilecek husus, zararlı maddelerden temiz olmasıdır. Bu zararlı maddeler yumuşak taneler, kil, çözünebilir tuzlar ve organik maddeler olabilir. Betonun teşkil eden diğer önemli bir madde de sudur. Suyun zararlı madde ihtiva etmemesi gerekir. Genellikle içilebilen su yeterlidir. Çimento, agrega ve sudan başka betona bazı katkı maddeleri de karıştırılabilir. Bunlar, su ilavesinden evvel veya sonra konulabilirler. Katkı maddeleriyle, betonun işlenebilme özelliği, dayanıklılığı, mukavemeti arttırabildiği gibi, sertleşmeyi geciktirebilir veya çabuklaştırabilir.

Uçucu küller çimentoda katkı maddesi olarak kullanılabildiği gibi beton teknolojisinde katkı maddesi olarak da kullanılmaktadır. Ülkemizde uçucu külün beton üretiminde katkı olarak kullanılması TS EN 450 standardına uygun olarak yapılmaktadır. Taze betonun işlenebilirliğini arttırması ve sertleşmiş betonun ileriki yaşlarda dayanımına katkısı nedeniyle iyi bir mineral katkıdır. Uçucu küller içerdikleri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarına bağlı olarak ASTM C 618 standardına göre F ve C sınıfı olarak iki genel sınıfa ayrılmaktadır. Üç temel bileşen olan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bileşenlerinin toplamı % 70 veya daha fazla ise uçucu kül teknik olarak F sınıfı kül olarak adlandırılır. C sınıfı küllerde ise aktif bileşenli silis veya alümine silikatlı cam olup bitümlü kömürden elde edilmektedir. C sınıfı küllerin içerdiği aktif bileşen kalsiyum alümine silikat linyit kömürünün yakılmasıyla elde edilmektedir. Ülkemizde faaliyet gösteren 15 farklı termik santralden yılda 15 milyon ton civarında uçucu kül elde edilmektedir (Topçu, 2008). Bu uçucu küllerin büyük bölümü F tipi uçucu küldür.

Adana ili Yumurtalık ilçesi Sugözü köyünde "Sugözü Termik Santrali" adı ile kurulan santralin kurulu gücü 2x605 MW ve toplam 1210 MW'lık enerji üretmektedir. Yurtdışından gemilerle getirilen ithal kömürle çalışan termik santralin temeli 2000 yılında atılmış ve 2004 yılında açılışı yapılmıştır. Sugözü termik santralinde pulvarize kömürün yakılması sonucunda saatte 60 ton kül oluşmaktadır. Meydana gelen uçucu küllerin faaliyet alanında belirlenen bir bölgede depolayacağı ve çimento fabrikalarına

hammadde olarak satılacağını veya verimli hale geleceği taahhüt edilmektedir.

Bu çalışmada;

- a) Sugözü termik santralinde atık olarak ortaya çıkan uçucu külün betonun mekanik özelliklerini nasıl etkilediğinin basınç, eğilmede çekme, yarmada çekme ve aşınma dayanımı deneyleriyle araştırılması,
- b) Bu külün betonun boşluk yapısını ve geçirimsizlik özelliklerini hangi yönde etkilediğinin belirlenmesi,
- c) Yüksek sıcaklığa maruz betonlarda Sugözü termik santrali uçucu külünü içeren betonların basınç dayanımlarının ne yönde etkilendiğinin incelenmesi,
- d) Elde edilen sonuçların yorumlanmasıyla bu külün betonda mineral katkı olarak hangi miktarlarda kullanılabileceğinin belirlenmesi ve bunun sonucunda bir atık madde olan bu malzemenin ekonomiye bir değer olarak katılmasını ve çevreye olan etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Uçucu kül gibi atık malzeme ve yan ürünlerin değerlendirilmesi, hem çok kısıtlı olan doğal malzemelerin kullanımını azaltarak doğanın tahrip edilmesini önlemekte, hem de malzemelerin atılmak üzere depolanması durumunda çevrede meydana gelecek problemleri en aza indirmektedir. Ayrıca silisli ve alüminli amorf yapıya sahip olmaları ve çok ince taneli olarak elde edilebilmeleri, uçucu küllerin de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermelerini sağlamaktadır. Bu nedenle, hem çimento üretiminde hem de beton katkı maddesi olarak büyük miktarlarda doğrudan kullanılabilirler (Baradan, 2012).

Uçucu külün betonda çimentoyla yer değiştirilerek kullanımı çimentodan büyük ölçüde ekonomi sağlar. Bunun yanında uçucu kül betonun işlenebilmesini, su gereksinimini, terlemesini, ayrışmasını ve hidrasyon ısını düşürür. Betonların ileri yaştaki dayanımlarını, geçirimsizliğini, zararlı kimyasallara dayanıklılığını artırır ve alkali-agrega reaksiyonunu bir oranda önler. Kısacası uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantajlar sağlar, atık bir madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur (Baradan, 2012).

### 2.1.Uçucu Küllü Betonlar

1970'li yıllarda bütün Dünyada yaşanan petrol krizinden sonra alternatif enerji kaynakları bulmaya, enerji kullanımını azaltmaya ve daha ekonomik malzemeler üretmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. İnşaat sektöründe de atık malzemelerin kullanılması ile ilgili araştırmalar halen devam etmektedir. Termik santral atığı olan uçucu küller, çok önemli çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu sebeple uçucu külün çeşitli alanlarda kullanılması ve değerlendirilmesi çok önemlidir. Uçucu külün özellikleri, bu malzemenin puzolanik bir malzeme olduğunu ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Aruntaş, 2006).

Toz kömürün termik santrallerde yakılması sırasında (yaklaşık 1200°C' da) baca gazları ile sürüklenen ve hızlı bir biçimde soğurken elektrofiltreler yardımıyla bacalarda tutulan ve genellikle boyutları 100 µm'den daha küçük inorganik uçucu kül tanecikleri



ortaya çıkmaktadır. Uçucu külün üretimi ve karakteristikleri; santral tipi, işletim biçimi, yakılan kömürün cinsi, yanma biçimi, kömür kompozisyonu ve yakma sistemine göre değişmektedir. Uçucu külün özellikleri aynı santralde bile gün içerisinde yapılan yüklemelerden dolayı değişebilmektedir. Uçucu kül, son yıllarda yapılan çok sayıda araştırmayla çimento ve beton üretiminde yaygın olarak değerlendirilen, puzolanik özellikleri olan bir maddedir. Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkilediği ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığını arttırdığı bilinmektedir. Uçucu küllerin boyutları genellikle 0,5 ile 200  $\mu\text{m}$  arasında değişen, camsı ve çoğunlukla küresel karakterdeki parçacıklardır. Özgül yüzeyleri ortalama 2800 – 3800  $\text{cm}^2/\text{g}$  dolayındadır. Uçucu külün yoğunluğu; inceliğine ve mineralojik yapısına bağlıdır. İçi dolu küresel tanelerden meydana gelen uçucu küllerin mutlak yoğunluğu ortalama 2,4  $\text{g}/\text{cm}^3$ 'dür. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, uçucu külün puzolanik reaksiyonunu hızlandırmak için farklı yaklaşımlar kullanılmış ve bu yaklaşımlarla uçucu kül aktifleştirilerek yapı malzemelerinde önemli bir katkı malzemesi olarak kullanımının yolu açılmıştır (Görhan, 2009).

Topçu (2001), çalışmasında endüstriyel bir atık olan uçucu külün betonda bağlayıcı malzeme olarak kullanımının beton özelliklerine etkisini araştırmıştır. Bu amaçla Çayırhan Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül, Eskişehir bölgesi agregaları ve PKÇ/B 32.5R çimentosu kullanılarak beton numuneleri üretilmiştir. Numuneler 300, 350, 400  $\text{kg}/\text{m}^3$  dozaj ve bu dozajların her biri için çimento yerine % 20 ve % 40 oranında uçucu kül katılarak elde edilmiştir. Üretim sırasında taze betonlarda çökme, Ve-Be, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Laboratuvar ortamında bekletilen numuneler 7, 28 ve 60 günün sonunda yapılan deneylerle uçucu külün beton üzerindeki fiziksel ve mekanik etkileri belirlenmiştir. İşlenebilirlik açısından yapılan incelemelerde dozaj azaldıkça uçucu kül katılan betonlarda uçucu kül katkısız kontrol betonlarına göre Ve-Be süresinin azaldığı görülmüştür. Uçucu kül kullanımının beton basınç dayanımını azalttığı ve uçucu kül miktarının artırılması durumunda dayanımın daha da geç kazanıldığı anlaşılmıştır. 2000 yılı birim fiyatları ile yapılan maliyet analizinde çimento yerine % 20 uçucu kül kullanılması ile beton birim maliyetinde ortalama % 10'luk, % 40 uçucu kül kullanılması ile de % 18'lik bir ekonomik kazanç elde edilmektedir. Ayrıca endüstriyel bir atık olması uçucu külün betonda kullanılması ile bu atığın depolanması maliyetini de

düşecektir.

Subaşı ve ark. (2006), hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılan uçucu kül katkı miktarının beton işlenebilirliğine ve priz sürelerine olan etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla karışım içerisinde %5, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ilavesi ile yapılan beton karışımları hazırlanmıştır. Beton işlenebilirliği Slump ve Ve-Be deneyleri ile belirlenmiştir. Hazırlanan her bir karışım için penetrasyon direnci yöntemiyle beton priz süresi tayini deneyi ile betonun 0,5 MPa, 1 MPa ve 3 MPa'lık direnç gösterdiği süreler hesaplanmıştır. Ayrıca hazırlanan karışımlardan elde edilen betonların 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Beton üretiminde; beton bileşen miktarları, dozaj ve çökme değeri sabit seçilmiştir. Sonuç olarak; çalışmada kullanılan uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak beton işlenebilirliğinin önemli ölçüde değiştiği, basınç dayanım değerlerinin uçucu kül ikame miktarı artışına bağlı olarak azaldığı görülmüştür. Ayrıca karışımlarda kullanılan uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak beton priz sürelerinin de değiştiği tespit edilmiştir.

Bir başka çalışmada, Soma termik santralinden elde edilen uçucu kül, iki farklı tras (Yenişehir, Bilecik) ve silis dumanı, çimento klinkerinin bir kısmı yerine katılımı ve elde edilen harçların basınç dayanım değerleri incelenmiştir. Ağırlıkça %5 silis dumanı içeren çimentoya %10 uçucu kül katılmıştır ve tras oranları ise %30, %35 ve %40 olarak değiştirilmiştir. Bu karışımların her birinin kimyasal analizleri yapılarak Blaine özgül yüzey alanı değerleri ölçülmüştür. Bu bulgular ışığında basınç dayanım sonuçları irdelenmiştir. Yapılan denemelerde en yüksek dayanım değerlerinin Bilecik trası ile hazırlanan ve yüksek inceliğe sahip olan puzolan içeren harçlarda elde edildiği saptanmıştır (Çelik ve ark., 2004).

Başığit (1993), çalışmasında yüksek oranda uçucu kül katılmasının beton özelliklerine etkilerini araştırmıştır. Çimento dozajı  $300 \text{ kg/m}^3$  olan ve çimentonun yerine kullanılan uçucu külü %10, %30, %50 ve %70 oranlarında kullanmıştır. Taze beton deneylerinde uçucu kül miktarının artması ile betonun işlenebilme özelliğinde bir artma meydana geldiğini ve böylece uçucu kül katkısının su ihtiyacını azalttığından dayanım artışına etkisinin olumlu olacağını belirtmiştir. Basınç dayanımları açısından optimum uçucu kül oranının %10-%30 arasında değiştiğini ve uçucu külün çimentoya katıldığı katkı nispetinde orantılı olarak hidratasyon ısısını düşürdüğünü belirtmiştir.

Güler (2005), yapmış olduğu çalışmada; uçucu küllerin özellikleri, kullanım teknolojileri ve dünyadaki kullanım alanlarını özetlemiştir.

Yiğiter (2004), C tipi uçucu kül içeren beton karışımlarının bazı fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini incelemiştir. Su içerisinde kür ve havada kür olmak üzere iki farklı kür yöntemi kullanmıştır. Çimento yerine % 40'a kadar uçucu kül ikame edilerek; beton numunelerinin basınç dayanımı, elastisite modülü, asit etkisine karşı dayanıklılığı, harç çubuğu örneklerinin hacim sabitliği ve bağlayıcı hamurlarının priz sürelerini ölçmüştür. Bu çalışma sonucu, uçucu kül kullanımının betonun erken yaşlardaki dayanımını düşürdüğu, buna karşın 3 günden sonra uçucu kül oranının artması ile basınç dayanımlarının arttığı bulunmuştur. Havada kür edilen numunelerin elastisite modülünün ve basınç dayanımının suda kür edilen numunelere kıyasla daha düşük olduğu ve uçucu kül oranı arttıkça kür hassasiyetinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca, uçucu kül kullanımı betonun sülfürik aside karşı dayanıklılığını arttırmıştır. Uçucu kül oranının artması bağlayıcı hamurlarını priz sürelerini uzattığı, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile bu negatif etkinin ortadan kalktığı görülmüştür. Harç numuneleri üzerinde yapılan boy ölçümlerinde ise, uçucu kül oranı arttıkça genleşmelerin arttığı gözlenmiştir.

Demirel (2010), mineral katkı olarak kullanılan uçucu külün karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, uçucu kül, CEM I 42,5 Portland çimento, Elazığ yöresi bazik karakterli pomza agregası ve karbon fiber kullanılarak; fiberli ve fibersiz, uçucu küllü ve uçucu külsüz olmak üzere 4 farklı seri hafif beton hazırlanmıştır. Gereken serilere, çimento ağırlığının %15'i kadar uçucu kül; yine çimento ağırlığının % 0,5'i kadar da karbon fiber ilave edilmiştir. Uçucu kül ve karbon fiberin kür yaşına bağlı olarak basınç dayanımına yaptığı etkiyi belirleyebilmek için serilerin 3, 7, 28 ve 365 günlük basınç dayanımı değerleri kaydedilmiştir. Karbon fiber ilavesi, mineral katkısız serilerde 28 günlük eğilmede çekme dayanımını % 21,91 ve uçucu kül katkılı serilerde de % 18,38 arttırmıştır. 365 gün kür edilmiş serilerin, 28 gün kür edilmiş serilere göre basınç dayanımı artış oranı mineral katkısız serilerde %20,86 ve uçucu kül katkılı serilerde ise %32,25'dir.

Bentli (2005), çalışmasında, Seyitömer termik santral uçucu küllerinin inşaat tuğlası yapımında katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Seyitömer termik

santralinden alınan uçucu baca külü ile endüstriyel çaptaki tuğla fabrikasında dört farklı reçetede %2,5, %5, %10, %15 baca küllü tuğlalar hazırlanmıştır. Birim hacim ağırlık, kuru pişme ve toplam küçülme, su emme ve mukavemet testleri sonucunda referans tuğlaya göre uçucu kül ilavesi birim hacim ağırlığını çok az miktarda arttırırken, kuruma, pişme ve toplam küçülmede belirgin bir değişime neden olmamıştır. Uçucu kül ilavesi, üretilen tüm reçete tuğlalarda su emme miktarını referans tuğlaya göre azaltmış, buna karşılık tuğlaların hiçbirinde referans tuğlada elde edilen dayanım değerine ulaşamamıştır.

Ünal (2004), çalışmasında beton bileşimi içerisine hacim olarak farklı oranlarda katılan yapay agregalarla üretilen betonların donma-çözülme özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla birinci seri betonların üretiminde uçucu kül, ikinci seri betonlarda mermer tozu kullanılmıştır. Uçucu kül, %10, %20, %30 oranlarında, mermer tozu ise %10, %15 ve %20 oranlarında beton içerisine katılmıştır. Üretilen beton numunelerde, 0,65 su/çimento oranı ve 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı esas alınmıştır. Aynı çimento dozajı ve su/çimento oranında kontrol betonu da üretilmiştir. Tüm numunelere 28 gün sonra donma-çözülme çevrimi uygulanmıştır. Numuneler üzerinde, su emme deneyine bağlı olarak difüzyon katsayıları hesaplanmıştır. Donma-çözülme deneyinden önce ve sonra ultrases geçiş süresi ölçülmüş ve buna bağlı olarak elastisite modülleri hesaplanmıştır. Ayrıca basınç deneyine göre dayanımlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, %10-15 oranında uçucu kül veya %10 mermer tozunun beton karışımında kullanılması halinde ekonomik yarar sağlanabileceği belirtilmiştir.

Güneyisi ve Gesoğlu (2004), uçucu kül ve metakaolin içeren kendiliğinden yerleşen harçlarda (KYH) yayılma, V-hunisi akma zamanı, viskozite ve priz alma süresi gibi taze özellikler ile basınç dayanımını deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla, su/bağlayıcı oranı 0,40 ve toplam bağlayıcı miktarı 550 kg/m<sup>3</sup> olan toplam 16 harç karışımı tasarlamıştır. 1 kontrol (sadece Portland çimentolu), 3 Portland çimentolu ve uçucu küllü, 3 Portland çimentolu ve metakaolinli ve 9 Portland çimento, uçucu kül ve metakaolin içeren toplam 16 farklı karışım tasarlamıştır. Tüm karışımlarda serbest yayılma 24-26 cm olacak şekilde yeteri miktarda yeni nesil kimyasal katkı katılmış ve taze özelliklerdeki değişimleri ölçmüştür. Deney sonuçlarına göre, uçucu külle kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresi kontrol harca göre oldukça uzamıştır.

Ayrıca, metakaolinin uçucu küllü kendiliğinden yerleşen harçlarda priz alma süresini önemli oranda azalttığı ve viskoziteyi ise artırdığı gözlenmiştir.

Ramyar (1993), çalışmasında Tunçbilek, Afşin-Elbistan, Seyitömer ve Soma-B santrallerinden çıkan uçucu küllerini beton özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneyler sonucunda, Tunçbilek ve Soma-B küllerinin, çimentonun ağırlıkça %40' ı oranında kullanılması durumunda dahi, Portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin birçok özelliğini iyi yönde etkiledikleri saptanmıştır. Bunun yanında, Afşin-Elbistan ve Seyitömer uçucu küllerinin yüksek dozda kullanılması durumunda Portland çimentosu-uçucu kül sistemlerinin birçok özelliğini olumsuz yönde etkilediğini belirtmiştir.

Yazıcı ve Baradan (1995), uçucu kül ilaveli yüksek dayanımda beton üretilmesi doğrultusunda bir laboratuvar çalışması yapmışlardır. Çalışmada çimento yerine %25 oranında uçucu kül ilavesiyle yüksek dayanımlı beton numuneler üretilmiştir. Bu yüksek dayanımlı numuneler fiziksel, mekanik ve durabilite deneylerine tabi tutulmuştur. Çimentonun %25' i oranında uçucu kül ilave edilerek oluşturulan numuneler 28. günde 68,4 MPa' lık basınç dayanımına ulaşarak, yüksek dayanımlı betondan %9,4 daha az dayanımda olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül katkısının betonlarda basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini azaltırken çekme ve eğilme dayanımları değerlerini çok az bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonda %25 oranında uçucu kül ilavesinin geçirimsizliği önemli miktarda azalttığını ve kimyasal etkilere karşı betonun dayanımının arttığı belirtilmiştir.

Erdinç (1995), çalışmasında Orhaneli uçucu külünün betonda dayanım ve klor geçirimsizliğini yönünde araştırmalar yapmıştır. Araştırma neticesinde, harç ve beton numunelerde uçucu kül kullanımı erken yaşlarda dayanımını bir miktar azalttığı gözlenmiş fakat devam eden pozolanik etki ile ileriki yaşlarda bu etkinin ortadan kalktığı da gözlenmiştir. Uçucu kül ilaveli betonlarda kılcallığın şahit numuneye göre arttığı ve salt çimentolu betonların uçucu küllü göre biraz daha düşük poroziteye sahip oldukları gözlenmiştir. Bütün yaşlarda uçucu külle betonlar sadece çimento kullanılarak yapılan betonlara göre klor geçirimsizliği daha düşük olabileceği gözlenmiştir.

Gökçe ve Özturan (1996), uçucu külün pozolanik aktivitesinin tayini ile ilgili mevcut bazı standartları ele almışlar, bu standartlardan elde edilen test sonuçlarını

birbirleri ile karşılaştırmışlar ve her standardın uygunluğunu tartışmışlardır. Söz konusu standartlar TS 639, Amerikan ASTM C311 ve İngiliz BS 3892 olmakla birlikte, TS 639 ayrıca modifiye edilmiş, böylece dört farklı test metodunu kapsayan bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada Seyitömer ve Soma termik santrallerinden temin ettikleri uçucu külleri kullanmışlardır. Sonuçta, TS 639'un öngördüğü test metodunun özellikle Seyitömer uçucu külü gibi harcın su ihtiyacını önemli derecede arttıran küller için uygun ve geçerli bir yöntem olmadığını bildirmişlerdir. TS 639, eşit S/(Ç+UK) oranı yerine ASTM ve BS standartlarında olduğu gibi eşit işlenebilme dikkate alınarak modifiye edildiğinde daha yüksek pozolanik aktivite sonuçları elde etmişler, ancak yine de ASTM ve BS standartlarından elde edilen düzeye ulaşamamışlardır. Standartlarda öngörülen farklı bağlayıcı malzeme miktarlarının pozolanik aktivite değerlerinin değişik düzeylerde olmasının esas sebeplerinden biri olduğunu belirtmişlerdir.

Turanlı ve ark. (1997), çalışmalarında Çayırhan uçucu külünün beton ve harçlar üzerindeki etkileri incelenmişlerdir. Karışımlarda çimento ağırlığının %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında uçucu kül ile yer değiştirmiştir. Numuneler normal kıvam, priz süresi, hidratasyon ısı, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve rötre deneylerine tabii tutularak incelenmiştir. Sonuç olarak; % 30 uçucu küllü betona kadar şahit numuneyle pek fazla farklılık olmadığı %40 uçucu kül katkılı numunelerde ise kıvamın arttığı gözlenmiştir, Uçucu küldeki yüksek kalsiyum oksit (CaO) içeriğinden dolayı priz başlangıç ve bitiş sürelerinde artış gözlenmiştir, Hidratasyon ısı değeri uçucu kül yüzdesi arttıkça arttığı gözlenmiştir. Katkılı betonların basınç ve eğilme dayanımı tüm numunelerde şahit numuneye göre az olduğu tespit edilmiştir, Buna ilaveten uçucu kül oranları arttıkça büzülmede artmıştır. Çalışmalarında sonuç olarak Çayırhan uçucu külünün çimento sistemlerinde %10 ile %20 arasında kullanılabileceği öngörülmüştür.

Özcan (1997), çalışmasında Seyitömer ve Tunçbilek santrallerinden sağladığı uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirerek betonların mekanik ve durabilite özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Deneyler sonucunda, uçucu küllerin betonda işlenebilirliği iyileştirdiğini ve betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemiştir. Basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulan numunelerden alınan sonuçlarda uçucu kül miktarı %10-20 arasında olan karışımlarda şahit numuneye göre erken yaşlarda düşük fakat ileriki yaşlarda daha yüksek dayanım elde edilmiştir. Seyitömer

uçucu külünün Tunçbilek uçucu külünden daha aktif olduğu da görülmüştür.

Atış (2000), çalışmasında yüksek oranda uçucu kül katkılı betonun aşınma direncini araştırmıştır. Aşınma dayanımındaki artış basınç dayanımındaki artışla paralellik göstermiştir. Yüksek beton basınç dayanımlarında, çimento yerine ağırlığının %70'i oranda uçucu kül kullanımının, betonun aşınma direncini aynı basınç dayanımına sahip şahit numunenin aşınma direncinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı katkı kullanımının beton dayanım özellikleri üzerinde bir etkisi olmadığı sadece kıvam ve yerleşmede faydalı olduğu gözlenmiştir.

Bir başka çalışmada, yüksek oranda kalsiyum içeren bir uçucu külün beton içinde kullanılabilirliğini ve hızlandırılmış kür etkisi karşısında ne gibi bir sonuç vereceği araştırılmıştır. Üç farklı dozajda ve üç farklı su/çimento oranında numuneler hazırlanmıştır. Uçucu külün çimento ile ağırlıkça %0, %15, %30 ve %45 yer değiştirmesi ile üretilen ve nemli ortamda kür edilen betonların 28 günlük ve 3 aylık basınç dayanımları ölçülmüştür. Standartlara uygun şekilde uygulanan ılık su ve kaynar su metodu ile hazırlanan numunelerin beton basınç dayanımları ölçülmüştür. Uçucu külün standart dışı olmasına rağmen, uçucu küllü betonların sadece Portland çimentosu ile üretilen beton numunelere yakın ya da daha yüksek dayanım geliştirmesinden dolayı uçucu külün %15 ve %30 yer değiştirme oranları arasında ağırlıkça çimentoyu ikame ederek beton içinde kullanılabileceğini belirtmiştir (Bilim, 2001).

Lee (2002), çalışmasında yüksek performanslı betonların gerilme-deformasyon karakteristiklerini incelemiştir. Çalışmasında uçucu kül %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. 28 günlük basınç dayanımları sonuçları göz önüne alındığında %10-20 oranında uçucu kül içeren betonların şahit betonla hemen hemen aynı değerlere sahip olduğu fakat %30 ikame miktarında ise dayanımlarda düşüş olduğu gözlenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda uçucu küllü betonların elastisite modül değerlerinin şahit betonlarınkinden biraz daha fazla olduğu gözlenmiştir. Yarmada çekme dayanımında ise kül miktarı arttıkça dayanımda azalmalar gözlenmiştir. Normal dayanımlı portland çimentolu betonlarda, uçucu külün betonların çekme dayanımlarında önemli bir değişiklik yapmadığını belirtmiştir. Çimento ile yer değiştiren uçucu külün gerilme şekil değiştirme eğrisinin yükselen kısmında bir değişiklik olmadığını ancak azalarak aşağıya inen tarafta ise az bir değişiklik olduğunu belirtmiştir. Böylece betonda

uçucu kül kullanımının betonun düktilitesini biraz arttırdığını bildirmiştir. Buna ilaveten %30 uçucu kül içeren betonların sünekliğinin bir miktar fazla olduğu gözlenmiştir.

Atiş ve ark. (2002), çalışmalarında standartlara uygun olmayan Afşin- Elbistan termik santrali uçucu külünü beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliğini basınç ve çekme dayanımı ve hidrasyon sonucunda sıcaklık yükselmesi açısından değerlendirmiştir. Çimento dozajı 300-400-500 kg/m<sup>3</sup> olan ve su-çimento oranları 0,35; 0,45; 0,55; uçucu kül yer değiştirme oranları da ağırlıkça %0, %10, %20, %30 olan otuz altı beton karışımı hazırlamışlardır. Numunelerin 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ile 7 günlük yarıma çekme dayanımları tespit edilmiştir. Beton hidrasyon süresince her saat başı termometre ile 24 saat boyunca ölçülmüştür. Sonuç olarak, Afşin-Elbistan uçucu külünün ağırlıkça %10-%20 oranında beton katkısı olarak kullanılabileceği fakat, beton ısını düşürmediğinden, hidrasyon ısını azaltmada kullanılamayacağını belirtmişlerdir.

Atiş (2003), çalışmasında yüksek dayanıma sahip, düşük kuruma rötresinde yüksek hacimli uçucu kül ikameli beton numuneler üzerinde çalışmada bulunmuşlardır. F sınıfı uçucu kül ile yapılan deneysel çalışmalarda, %50 ve %70 uçucu kül ikame oranlarına sahip beton numunelerin, sadece portland çimentosundan elde edilen betonla kıyaslandığında rötre değerlerinde önemli derecede düşüş olduğu gözlenmiştir. Kullanılan akışkanlaştırıcının rötreyi arttırdığı, uçucu kül ilavesinin rötreyi %40 oranında azalttığı görülmüştür.

Afşin-Elbistan termik santrali atık malzemesi olan uçucu külün çimento ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği, harç ve çimento hamuruna ilavesi ile elde edilecek değerler çeşitli deney yöntemleriyle araştırılmıştır. Karışım oranının %10-20 arasında uçucu kül içeren betonların kontrol numunesine yakın sonuçlar verdiği basınç, çekme, aşınma dayanımı karbonatlaşma, boşluk oranı ve kapiler su emme katsayısı deneylerinde gözlemlenmiştir. Fakat, %10 oranında uçucu kül içeren harç karışımlarının daha kabul edilebilir sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu küllerin içinde bulunan ve şişme etkisi gösteren bileşenlerin bir sonucu olarak, Afşin-Elbistan küllerinin rötre azaltıcı ya da rötre dengeleyici bir özelliğinin olduğu ortaya çıktığını belirtmiştir. Bu uçucu külün rötre düzenleyici katkı olarak kullanılabileceği kanaatine varılmıştır. Külün daha da inceltilerek kullanılması sonucunda harç numunelerinde gelişme gözlemlenmiş olup,



dayanımlarda artış, boşluk oranı, karbonatlaşma ve kapiler su emme katsayılarında düşüş belirlemiştir (Sevim, 2003).

Siddique (2004), çalışmasında F sınıfı uçucu külü %35, %45 ve %55 oranlarında botanik adı *Crotalaria juncea*, uzunluğu 25 mm bir bitki olan san liflerle birlikte %0,25; %0,50 ve %0,75 oranlarında kullanılarak betonlar üretmiştir. Su/bağlayıcı oranı 0,47 ve akışkanlaştırıcı/bağlayıcı oranı ise %1,5 seçmiştir. Deneylerde işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dirençlerini araştırmıştır. Deneyler sonucunda çimentonun ağırlıkça üç farklı oranda uçucu kül ile yer değiştirmesi ile şahide göre işlenebilirliğin arttığı, san liflerin artması ile ise slump'ın düştüğünü görmüştür. San lifli uçucu küllü betonlarda Ve-Be zamanının artan lif oranı ile artmakta artan kül oranı ile azalmakta olduğunu görmüştür. Basınç dayanımlarının 28. gün sonunda %32, %43 ve %48 oranında düştüğünü ve bu etkinin külden kaynaklandığı san liflerin dayanıma bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Yarmada çekme dayanımlarının uçucu kül ile birlikte azaldığını, ancak san liflerin yarmada çekme dayanımını arttırdığını belirtmiştir. Eğilme dayanımlarının da uçucu kül oranı artarken azalmakta olduğunu, ancak san liflerin eğilme dayanımlarını da arttırmakta olduğunu belirtmiştir.

Wang ve ark. (2004), çalışmalarında çimento ve uçucu kül sisteminde, çimento klinkerinin hidrasyon derecesini ve uçucu külün puzolanik reaksiyon derecesini belirlemek için geliştirilen metottan bahsetmişlerdir. Sonuçta uçucu külün iki aktif etkisi olduğunu tespit etmişlerdir. Birinci olarak, uçucu külün çok kuvvetli puzolanik etkiye sahip ve  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girebileceğini belirtmişlerdir. İkinci olarak ise, çimentonun hidrasyonunu hızlandırabileceğini belirtmişlerdir. Uçucu kül miktarı az olduğunda, puzolanik aktivitesinin yeterli geldiğini ama çimentonun hidrasyonunu hızlandırma etkisi zayıf olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül miktarı fazla olduğunda ise, puzolanik aktivite etkisinin daha az, ancak çimento hidrasyonunu hızlandırma etkisinin daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Siddique (2004b), Hindistan da, çoğunluğu F sınıfı olan ve yılda 88 milyon tondan fazla meydana gelen uçucu küller üzerinde çalışmıştır. Betonda F sınıfı uçucu külü çimento ile üç farklı (%40, %45 ve %50) yüzdelik oranlarda yer değiştirerek yüksek hacimli uçucu küllü betonlar üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Taze

beton özelliklerinden slump, hava miktarı, birim ağırlık ve sıcaklıkları test etmiştir. Sertleşmiş beton deneylerinden ise basınç dayanımı, yarma ve eğilme dayanımları ile beton elastisite modülü ve aşınma direnci tayini deneylerini 365 güne kadar test etmiştir. Deneylerin sonunda; üç farklı uçucu kül oranının çimento ile yer değiştirmesi ile basınç dayanımı, yarma dayanımı, eğilme dayanımı ve beton elastisite modülü 28 günde azaldığını ancak devamlı ve önemli bir gelişme ve artış 28 günden sonra meydana geldiğini belirtmiştir. %40, %45 ve %50 uçucu kül oranı 28. gün için bile beton dayanımı prekast (önyapımlı) ve güçlendirilmiş çimentolu beton yapılarda kullanımı için yeterli olduğunu bildirmiştir. Betonun aşınma direncinin tüm beton karışımları için uçucu kül miktarına bakılmaksızın zamanla yaşları arttıkça aşınma dirençlerinin arttığını rapor etmiştir.

Atış ve ark. (2004a), uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış beton konusundaki çalışmalarında üç farklı normal portland çimento dozajı 200, 300, 400 kg/m<sup>3</sup> olan silindirle sıkıştırılmış betonlar üretilmişlerdir. Yerel bir uçucu kül de ağırlıkça %0, %15, %30 ve %45 oranlarında normal portland çimentosuna ikame etmek suretiyle beton üretiminde kullanılmıştır. Kullanılan uçucu kül standart dışı olup, yüksek oranda kireç içermektedir. Tam sıkıştırma elde edilinceye kadar bağlayıcı malzeme oranları titreşimli çökme testi ile belirlenmiştir. Tam sıkıştırma elde edilince beton numuneler üzerinde basınç, eğilme ve yarma deneyleri yürütülmüştür. Kullanılan külün standart dışı olmasına rağmen, deney sonuçları uçucu küllü beton dayanımlarının normal portland çimentosu betonlarına göre kıyaslanabilir ya da daha yüksek dayanım özelliklerinden dolayı, bu külün çimentoya ağırlıkça %15-%30 arasında ikame edilebileceğini göstermiştir. Dayanım açısından bakıldığında, üretilen ve testleri yapılan silindirle sıkıştırılmış betonun yol kaplaması ve büyük yer döşemeleri için alternatif bir malzeme olacağı sonuç olarak çıkarılmıştır.

Dinçer (2004), çalışmasında Çatalağzı uçucu külünün çimento yerine ağırlıkça %0, %5, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ilavesi ile karışımlar hazırlamıştır. Çimento yerine ilave edilen uçucu kül miktarı % 20 olduğu karışımlarda, beton özelliklerinin kontrol beton numunesinden daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Uçucu kül oranı %20'ye kadar olan betonların basınç dayanımları 90 güne sonunda kontrol beton dayanımları kadar, 180 günden sonra ise dayanımların daha fazla

olduğunu görmüştür. %30 oranında ilavesinde ise kontrol betona göre %10-15 düşüş görüldüğü fakat kabul edilebilir sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Çekme dayanımlarının da basınç dayanımına paralellik gösterdiği, elastisite modülü değerlerinin basınç dayanımında olduğu gibi azalma göstermediği tespit edilmiştir. Uçucu kül miktarı arttıkça hacimce ince malzeme miktarı arttığından, uçucu kül katkısı ile birlikte beton kompasitesi de artmıştır. Bundan dolayı basınç dayanımında gözle görülür bir azalma olmasına rağmen, elastisite modülünde azalma gözlenmemiştir.

Atiş (2005), çalışmasında yüksek hacimli uçucu kül içeren, silindire sıkıştırılmış süper plastik işlenebilir betonu ıslak ve kuru kür uygulanması durumunda dayanım özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karışımlarda su/çimento oranı 0,28 ve 0,43 olan, %0, %50 ve %70 oranlarında çimento ile yer değişim oranlarında iki farklı düşük kireçli F sınıfı uçucu küller ile hazırlanmıştır. Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları değerleri sonuçları elde edilmiştir. Eğilme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi, kür koşullarının etkisini ve kızdırma kaybının uçucu küllerin su ihtiyacı ve dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak yüksek dayanımlı betonun yüksek hacimli betonlar ile mümkün olabileceğini ve kızdırma kaybının artışının taze betonun su ihtiyacını arttırdığını belirtmiştir. Yüksek hacimli uçucu küllü betonların portland çimentolu betonlara göre kuru kür şartlarına karşı daha hassas ve zayıf olduğunu fakat yine de yüksek hacimli uçucu küllü betonların yapılar da yol ve kaldırım uygulamalarında kullanılabilir bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

## **2.2.Sugözü Termik Santrali Uçucu Külünün Betonda Kullanımı İle İlgili Çalışmalar**

Literatürde Sugözü termik santrali uçucu külünün betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanılmasıyla ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Günindi (2005), çalışmasında, yüksek oranda Yumurtalık-Sugözü uçucu külü içeren betonun basınç, eğilme ve aşınmaya karşı direncini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada değişik miktarlarda uçucu kül kullanılarak farklı beton karışımları elde edilmiş ve süper akışkanlaştırıcı yardımı ile sabit su-çimento oranında betonlar üretilmiştir. Bu beton karışımlar teste tabii tutulmuş olup, elde edilen deney sonuçları

karşılaştırılmıştır. Uçucu kül kullanımı ile çimento miktarından tasarruf sağlanmıştır. Beton basınç dayanımı arttıkça aşınma direncinin de arttığı görülmüştür. Uçucu kül kullanımı ile ağırlıkça %10 yer değiştirme oranında normal beton dayanımına eşdeğer dayanım elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. Uçucu kül içeren betonun dayanım özellikleri ile normal betonun özellikleri arasındaki ilişkinin benzer olduğu sonucuna varılmıştır. Laboratuvarda elde edilen verilere dayanarak mevcut uçucu külün çimentoyu %10-40 oranında ikame edebileceği ve incelenen betonun, uygun bir şekilde dizayn edildiği takdirde özellikle beton yol kaplaması olarak kullanılabileceği kanaati oluşmuştur.

Karahan (2006), yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, Sugözü termik santralinde ikincil ürün olarak meydana çıkan uçucu külün beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliğini sertleşmiş betonlarda basınç, eğilme, yarmada çekme dayanımları, elastisite modülü, boşluk oranı, su emme oranı, kapiler su emme katsayısı, kuruma rötresi ve donma çözülme özellikleri açısından değerlendirmiştir. Hazırlanan beton karışımlarının bağlayıcı (çimento+kül) miktarı birim metreküp için yaklaşık 400 kg'dır. Bütün karışımlarda, maksimum tane çapı 16 mm olan %55 iri ve %45 ince agrega kullanılmış, su/bağlayıcı oranı 0,35'de, hiper akışkanlaştırıcı ve bağlayıcı oranı da %1'de sabit tutulmuştur. F tipi uçucu kül ağırlıkça ikame yoluyla betona %0, %10, %15, %20, %25, %30 ve %45 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek uçucu kül katkılı beton karışımlar hazırlanmıştır. Laboratuar çalışması sonucunda, Sugözü uçucu külünün betonda mineral katkı olarak %30 mertebesine kadar ikame edilebileceği, hatta yüksek oranlarda uçucu kül içeren betonlarda %45 ve üzeri kullanılabileceği, böylece ekonomik ve ekolojik faydalarında elde edileceği kanaati oluşmuştur.

Benim çalışmam da bu çalışmadan farklı olarak su/bağlayıcı oranı 0,45' de sabit tutuldu, agregalar %40 (0-4 mm), %30 (4-11 mm), %30 (11-22 mm) yüzdelerinde beton karışımında kullanılmıştır. Kontrol betonu %0 uçucu kül oranına sahip olup, diğer numunelerde çimento ile %10, %20, %30, %40 oranlarında uçucu kül yer değiştirilerek beş farklı numune hazırlanmıştır. Uygulanan deney yöntemlerinden farklı olarak beton gaz geçirgenlik, ultrasonik ses, basınçlı su geçirimsizlik, yüksek sıcaklık etkisi deneyleri yapılmıştır. Çimentonun yerine %10-%20'si oranında uçucu kül ile yer değiştirildiği numunelerde maksimum dayanımlar elde edilmiştir.

Bir başka çalışmada, Niğde bölgesinden temin edilen mikrokalsitin ve Yumurtalık Sugözü Termik Santralinden elde edilen uçucu külün beton özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Karışımlarda, bağlayıcı miktarı ile s/b oranı sabit tutulmuştur. Mikronize kalsit ve uçucu kül hem ayrı ayrı, hem de birlikte çimento ile %10 ve %20 oranlarında ikame edilerek toplam 7 karışım hazırlanmıştır. Karışımlar üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Mikrokalsitin, taze beton özellikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Mikrokalsit katkılı betonların erken yaşlardaki basınç dayanımları, şahit ve uçucu kül katkılı betonlara oranla daha yüksek çıkmıştır. Ancak, ileri yaşlarda mikrokalsit katkılı betonların basınç dayanımı, aşınma ve geçirgenlik dirençlerinin daha düşük olduğu görülmüştür.

### **3.MATERYAL VE YÖNTEM**

#### **3.1. Materyal**

#### **3.2. Uçucu Küller**

Endüstriyel yakıt olarak ve konutlarda ısınma amacıyla kullanılma imkanı olmayan düşük kalorili kömürlerden, elektrik enerjisi üretmek amacıyla kurulan termik santrallerde yararlanılmaktadır. Bu tip kömürler Termik santrallerde, buhar üreten kazanları ısıtmak amacıyla çoğunlukla pulvarize (öğütülmüş) halde yakılır. 75 µm' lik elekten %80'i geçecek şekilde kırılıp inceltelen kömür tozları önceden ısıtılmış hava ile karıştırılır ve yanma için kazanın içine üflenir (Cook, 1983). Bu yanma sonucunda farklı özellikteki çeşitli gazlar ve bazı atıklar (kömür külleri ve yanmayan kalıntı ) açığa çıkar. Genellikle, termik santrallerde yakılan taş kömürlerinin %10-15'i, linyit kömürlerinin ise %35-40'ı küldür.

Oluşan atığın %75-80 lik birincil kısmı, çok küçük tanecikler halinde yanma odasından gazlarla birlikte bacadan havaya çıkarken, elektrostatik filtreler veya elektromekanik yöntemler kullanılarak tutulur ve kül toplayıcı silolara kanalize edilir. Daha sonra da, silolardan konveyör bantlarla veya başka yöntemlerle, termik santrallerin uzağındaki bir yere atık olarak kuru ve yaş ortamda depolanmaktadır. Modern santrallerde, bu ince malzemelerin %99'u gaz çıkmadan önce tutulmaktadır (Meininger, 1982).

Uçucu kül, pulvarize kömür ile çalışan termik santrallerin, yanma sonucu elde edilen bir yan ürünü olan çok ince kalıntılarıdır. İngiltere gibi bazı ülkelerde bu yan ürüne, pulvarize uçucu kül (pulverized fuel ash–pfa) denilmektedir. Uçucu külden başka, atık malzeme olarak daha büyük tanecikler halinde fırının altında bir başka atık daha elde edilir. Bu atık malzemeye "kazan altı külü veya cürufu" denilir. Bu malzemeler ise beton hariç, başka amaçlar için hafif agrega olarak değerlendirilebilir (Gutt ve Nixon, 1979).

Kömüre dayalı termik santral sayısının gün geçtikçe çoğalması kül üretiminin artmasına ve beraberinde önemli ekolojik, ekonomik ve teknik sorunlara yol

açmaktadır. Termik santralin 1 kWh' lik enerji üretiminde kömür kalitesine göre değişmekle birlikte yaklaşık 110 g kül atık madde olarak açığa çıkmaktadır. 1000 MW'lık bir santralden yılda yaklaşık 650000 ton uçucu kül ve taban külü elde edilmektedir. Dolayısıyla bu küllerin santrallerden uzaklaştırılması ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji, üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunları yaratabilmektedir (Tokyay ve Erdoğan, 1998). Uçucu küllerin pozolanik özelliğe sahip olması, çimento ve beton üretiminde kullanılmasına olanak vermektedir.

Ülkemizde termik santrallerde açığa çıkan atık miktarı hakkında sağlıklı bir bilgi bulunmamaktadır. Ancak 2003 yılı verilerine göre 18 milyon ton uçucu kül açığa çıktığı tahmin edilmektedir. Açığa çıkan uçucu külün 400 bin tonu separatörlerden geçirilerek yaklaşık 300 ila 400 bin tonu da separatörlerden geçirilmeden beton üretiminde kullanılmıştır. Diğer bir deyişle açığa çıkan uçucu küllerin ancak %4'ü değerlendirilebilmiştir (Yazıcı, 2004). Ancak bu oranın günümüzde çok daha yüksek olduğu bilinmektedir.

### **3.2.1. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları**

Uçucu küllerin en çok kullanıldığı alanların başında inşaat sektörü gelmektedir. Bu alanda yapılan çalışmaların çoğu uçucu küllerin çimento, beton, tuğla, hafif agrega üretiminde ve zemin stabilizasyonu ile dolgu işlerinde kullanılmasına yöneliktir. Bunların yanı sıra uçucu kül absorban olarak atık suların arıtılmasında, asidik karakterli toprak ıslahında, döküm ve metal sanayisinde, sondaj işlerinde ve karlanma ile buzlanmanın önlenmesinde de kullanılmaktadır (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Uçucu kül üzerinde ilk araştırmalara, 1930 yılında ABD'de başlanmış ve 1938 yılında ilk defa Chicago' da bir yol yapımında çimentoya karıştırılarak kullanılmıştır. İkinci dünya savaşından sonra, malzeme darlığından dolayı bu malzemenin kullanımı gerek ABD'de gerekse Avrupa'da son derece yaygınlaşmıştır (Postacıoğlu, 1986).

Türkiye 'de uçucu külün kullanımına yönelik ilk araştırma ve çalışmalar Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından 1968 yılında yapılmıştır. Bu kurum tarafından Tunçbilek termik santrali uçucu külleri üzerinde yapılan araştırmalar sonucu bu kül, Gökçekaya ve Porsuk barajı inşaatlarında kullanılmıştır. Ayrıca prefabrike kanalet imalatında da 1500 ton civarında Tunçbilek uçucu külü kullanılmıştır. Aynı yıllarda Türkiye Cumhuriyeti

Karayolları (TCK) laboratuvarlarında yapılan araştırmalardan elde edilen olumlu sonuçlar ile 1966 yılında, 4. Bölge Pazar köprüsü inşaatında uçucu küllü beton kullanılmıştır. Ayrıca Kütahya- Tavşanlı yolunun 700 m' lik bir bölümünde uçucu kül-çimento stabilizasyonu uygulanmıştır (Atanur ve Yağız, 1970).

Çimento fabrikalarında ilk uçucu kül kullanımı ise, 1970' li yılların başında Afyon ve Balıkesir çimento fabrikasında Soma ve Seyitömer termik santrallerinin uçucu küllerinin kullanımı ile olmuştur (Orhun ve ark., 1970). Uçucu küllerin değeri günümüzde daha iyi anlaşıldığından, katkılı çimento üretiminde ve hazır beton sektöründe kullanımı en yaygın mineral katkıdır.

### 3.2.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller puzolanik özellik gösterirler. Kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri ya hiç yoktur veya çok azdır. Nemin varlığı ile  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile kimyasal reaksiyona girip kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) bileşenlerini oluşturur ve bağlayıcılık özelliği elde edilir.

Birçok ülke şartnamelerinde, uçucu külün sınıflandırılması ile ilgili bir şart yoktur. Ancak ASTM C618 standardı, uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine ve elde edildikleri kömür cinsine bağlı olarak C ve F sınıfı olarak sınıflandırılmıştır. ASTM C618' e göre uçucu kül sınıflandırılması aşağıda Çizelge 3.1.' de verilmiştir (ASTM C 618-94a, 1994).

Çizelge 3.1. Uçucu kül sınıfları ( ASTM C618'e göre)

| SINIF | Tanımı                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| F     | $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller ). Yalnızca puzolanik özelliğe sahip.                                                                                 |
| C     | $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > \%50$ linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç ( $\text{CaO}$ ) içeriği $\%10$ 'dan fazla olabilir (Yüksek kireçli uçucu kül). Puzolanik ve bir miktar bağlayıcılık özelliğine sahip. |

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında ayrıca, kireç ( $\text{CaO}$ ) miktarına göre yapılan sınıflandırmalar da bulunmaktadır. Son yıllarda oldukça geniş kabul gören  $\text{CaO}$  miktarına göre sınıflandırmada,  $\text{CaO}$  miktarı  $\%10$ 'dan az olan uçucu küller düşük



kireçli (düşük kalsiyumlu), %10 'un üstünde olanlar ise yüksek kireçli (yüksek kalsiyumlu ) olarak adlandırılırlar. % 10' dan fazla CaO içeren uçucu küller puzolanik özellikleri yanında, kendi başına bağlayıcılık özelliği de gösterirler (Erdoğan, 1997).

TS EN 197-1 (2002) göre uçucu küller silissi V ve kalkersi W gruplarına ayrılırlar.

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

2. W sınıfı küller, hidrolik ve/veya puzolanik özellikleri olan ince bir toz olup, esas olarak reaktif kireç (CaO), reaktif  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'den oluşan, geri kalanı demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küllerde, reaktif kireç (CaO) oranının %10'dan fazla, reaktif silis miktarının da %25'den fazla olması gerekmektedir.

### **3.2.3. Uçucu Küllerin Kimyasal, Mineralojik, Morfolojik Yapıları ve Özellikleri**

Uçucu küllerin kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik kökeni ve işlem koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfürizasyon gibi) bağlıdır. Uçucu küllerin kimyasal yapısı esas olarak silika ( $\text{SiO}_2$ ), alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve demir oksit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )' den oluşur. Bu oksitlere ek olarak, tiplerine göre ayrıca, az miktarlarda CaO, MgO,  $\text{SO}_3$ , alkaliler ve yanmamış kömür parçacıkları (C, karbon) da içerirler. (Baradan, 2012)

Diğer oksitlerden MgO en fazla %5, alkali oksitler ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) %5' in altında bulunur.  $\text{SO}_3$  miktarı genellikle %0.2-2.5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve işlem koşullarına göre % 10'a kadar çıkabilir. Ancak, TS EN 450 standardı,  $\text{SO}_3$  değerini %3 olarak dar bir aralıkta sınırlandırmıştır (TS EN 450, 1988). Yanmamış kömür parçacıklarını temsil eden kızdırma kaybı, %1-10 arasında değişmektedir (Lane ve Best, 1982). Karbon oranı termik santralin verimine de bağlıdır. Genel olarak modern termik santrallerde bu miktar %3'ün altındadır. Çizelge 3.2.' de F tipi uçucu kül

ile C sınıfı uçucu külden elde edilen kimyasal özelliklerin değişim aralığı verilmiştir (ACI Committee 226.3R-87, 1990).

Çizelge 3.2. Uçucu küllerin kimyasal özellikleri(ACI Committee 226.3r-87, 1990)

| Kimyasal Özellik               | F sınıfı (CaO < %10) | C sınıfı (CaO > %10) |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 43.6-64.4            | 23.1-50.5            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 19.6-30.1            | 13.3-21.3            |
| 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              | 0-2.8                | 0.4-1.9              |
| KK                             | 0.4-0.72             | 0.3-1.9              |

Uçucu küllerin puzolanik özellikleri, kimyasal kompozisyonlarından çok mineralojik yapılarına bağlıdır. Düşük kireçli uçucu küllerdeki ana aktif bileşen, silis ve alümina açısından zengin, alümina silikat bileşiminde amorf veya camsı fazdır. Düşük kireçli uçucu küllerin camsı faz miktarları, yüksek kireçlilere oranla daha yüksektir. Ancak, yüksek kireçli uçucu küller daha reaktiftir. Düşük kireçli uçucu küldenki yüksek kireçli camsı faz genellikle kalsiyum, alkali ve hidroksit ilavesi halinde yavaş olarak reaksiyona girer (Baradan, 2012).

Yüksek kireçli uçucu külün, camsı ve kristalize fazları külün puzolanik özelliğinin yanı sıra, kısmen kendiliğinden bağlayıcı olma özelliğini de sağlar. Uçucu küllerin şekil ve büyüklüğünün dağılımında, kömürün kökeni ve üniform olması, kömürün öğütülme durumu ve yanma koşulları (sıcaklık ve oksijen seviyesi), yanmanın üniformluğu ve toz toplama sistemi gibi işlemlere bağlı faktörler etkili olmaktadır.

Uçucu küller, senosfer (içi boşluklu) ve plerosfer (iç içe girmiş) olarak adlandırılan, süngerimsi yapıda camsı kürecikler, yanma sonucu dekompoze olmuş kil safsızlıkları, hemetit ve menyetit kürecikleri, bir kristal üzerinde oluşan daha kaba kürecikler (demosfer), diğer mineral parçacıkları ve yanmamış kömür taneciklerinden oluşur (Türker ve ark., 2003).

### 3.2.4. Kimyasal Oksitlerin Uçucu Kül Özelliklerine Etkileri

Uçucu külde bulunan CaO miktarı, termik santralde yakılan kömürün cinsine bağlıdır. Bitümlü kömürlerden elde edilen uçucu külün reaktif CaO içeriği % 10'dan az iken, linyit kömüründen elde edilenlerin reaktif CaO içeriği %10'dan fazladır. Yüksek kireç içeren uçucu küllü betonlar üzerinde yapılan araştırmalar, bu tür küllerin beton özellikleri üzerinde olumsuz bir etki yapmadığını göstermiştir (Erdoğan. 1996, 1991). Ancak serbest kirecin yüksek miktarda olduğu bazı küllerle üretilen betonlarda genleşme nedeniyle çatlama riski bulunmaktadır. Yüksek kireç miktarı bu tip uçucu küllere puzolanik özelliğin yanı sıra tek başına az da olsa bağlayıcılık özelliği sağlamaktadır. Düşük kireçli uçucu kül ile kıyaslandığında, yüksek kireçli uçucu külün daha erken dayanım kazanımı sağladığı görülmektedir. Uçucu küldeki CaO miktarı için standartlarda bir limit bulunmamaktadır. Ancak serbest kireç, hidrasyon sırasında kalsiyum hidroksit (portlandit) haline dönüşerek, betonda genleşme ve çatlak oluşumuna sebep olabilir. Bu nedenle serbest kireç miktarı TS EN 450' de %1 ile sınırlandırılmıştır (TS EN 450, 1988).

Bilindiği üzere uçucu külün silisli bileşenleri nemli ortamda  $\text{Ca(OH)}_2$  ile birleşerek bağlayıcı özelliği olan C-S-H jellerini oluşturur. Bu kimyasal reaksiyon çimentonun hidrasyonu ile oluşan C-S-H jellerine ilave olarak ortaya çıkar ve betonun dayanım kazanmasına katkıda bulunur. Bu nedenle ilk zamanlarda yapılan ASTM C 350-354 standartları uçucu külün en az %40 oranında silika içeriğine sahip olması gerektiğini belirtmiştir. Daha sonra yapılan araştırmalara göre puzolanik aktivite ve  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  arasında direkt bir ilişki olduğu görülmüştür. Uçucu külün bağlayıcı özelliğinin toplam oksit miktarından çok reaktif silika, alümina ve demire bağlı olmasına rağmen 1960'tan sonra yayınlanan standartlar  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarını uçucu kül ağırlığının minimum bir yüzdesi olarak belirlemişlerdir (Sevim, 2003).

MgO hidrasyonu yavaş gelişen bir maddedir. Ancak, hidrate olduğunda meydana gelen hidrasyon ürününün miktarı büyük bir hacim kaplar ve sertleşmiş betonun genleşip çatlamasına yol açar. Uçucu kül şartnamelerinin büyük bir bölümünde MgO miktarı en çok %5 ile sınırlandırılmıştır.

Yüksek miktarda  $\text{SO}_3$  içeriği, ileri yüksek miktarda kalsiyum alümina sülfat hidrate (etrenjit) oluşumuna yol açtığından, sertleşmiş betonda genleşme ve bozulmalar oluşturur. Uçucu kül ile ilgili ASTM şartnamelerinin büyük bir bölümünde  $\text{MgO}$  miktarı en çok %5 ile belirlenmiştir.

Yapılan çalışmalar uçucu külde bulunan amorf silisin çimento ve uçucu kül içindeki alkalilerle reaksiyon yaparak, alkali-silika reaksiyonunu azalttığını göstermiştir. Birçok uçucu külde  $\text{Na}_2\text{O}$  olarak ifade edilen eşdeğer alkali oksit miktarı % 1.5' den azdır. Ancak, uçucu külde yüksek miktarlarda alkali varsa alkali-silika reaksiyonunu azaltma etkisi zorlaşabilmektedir (Erdoğan, 1997).

Uçucu külün kızdırma kaybı, yanmamış karbon tanelerinin, çok küçük miktarlardaki kimyasal bağ neminin ve sülfürün kızdırma esnasındaki kaybından olmaktadır. Karbon, bağlayıcılık bakımından aktif olmayan bir maddedir. Yanmamış karbon taneleri, özellikle hava sürükleyici katkılar gibi kimyasal katkılar ile gözlü bir birleşme eğilimi gösterirler. Bu nedenle yüksek kızdırma kaybına ve karbon içeriğine sahip olan uçucu küller genellikle daha fazla hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı katkı dozajı gerektirirler (Erdoğan ve ark., 2003; Costa ve Massaraz, 1977). ASTM C618' de uçucu küllerde kızdırma kaybı %6 ile sınırlandırılmıştır.

### 3.2.5. Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Şekil yapısı, tane dağılımı, incelik, su ihtiyacı, hacim değişimi, uniformluk, su içeriği ve yoğunluk uçucu küllerde en önemli fiziksel özelliklerdir.

Uçucu küller, büyüklükleri 0.5  $\mu\text{m}$  ile 150  $\mu\text{m}$  arasında değişen camsı küresel ve düzensiz şekilli taneciklerden oluşur. Bu taneciklerin %75 kadarı 45  $\mu\text{m}$  (No. 235)' den daha küçüktür. Bu taneciklerin şekil ve büyüklüğü, uçucu külün tipine ve uçucu kül toplama sistemine göre değişmektedir. Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz veya boşluklu (senosfer), büyük bir küre içinde küçük küreler kümesi içeren yapılar (plerosfer), yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar, yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar, deforme yapılar ve yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi değişik şekillerde bulunabilir (Bosbach ve Enders, 1998).

Uçucu küllerin incelikleri, termik santrallerin uçucu kül tutma sistemlerine bağlıdır. Genellikle, elektrostatik yöntemler ile tutulan uçucu küller, çimento ve beton üretiminde kullanımı bakımından daha uygundur. Uçucu küllerin inceliklerinin tayini yöntemleri konusunda araştırmacılar arasında farklı görüşler vardır. İnceliğin, Blaine yöntemi ile özgül yüzey cinsinden ölçülmesi, Portland çimentoları için anlamlı kabul edilirken, uçucu küller için aynı güvenilirlikte olmayacağı ileri sürülmektedir.

Uçucu külün inceliği, pozolanik aktivite hızını ve betonun işlenebilirliğini etkiler. Ayrıca, betonun su içeriğini ve hava sürükleyici katkı miktarını da etkileyebilir. Genellikle uçucu küller, küresel şekilleri nedeniyle betonun su ihtiyacını azaltır ve işlenebilirliğini geliştirirler. Ancak çok fazla incelik, aynı miktarda hava sürüklemek için gerekli hava sürükleyici katkı miktarını da artırır.

Yakılan kömürün cinsine ve termik santrallere göre uçucu küller farklı renklerde olabilirler. Genellikle yığın halindeyken rengi grimsidir. Renk, yanmamış kömür parçacıklarından dolayı daha koyu renkte de olabilir. Yüksek demir içeriği uçucu külün esmer renk almasını sağlar. Çoğunlukla uçucu kül görünüşü itibari ile Portland çimentosuna benzemektedir (Erdoğan, 1997).

Uçucu küllerin tane boyutu ve tane boyutu dağılımı, uygun bir üniformluğa sahip olmalıdır. Uçucu külün üniformitesi inceliği ve yoğunluğu saptanarak kontrol edilir.

Çeşitli standartlara göre uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin olması gereken değerleri Çizelge 3.3.' de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Uçucu küller için fiziksel ve kimyasal standart sınırlar

| Özellik                                                                                  | BSI  | ASTM-F | ASTM-C | TS EN   | TS  |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|--------|--------|---------|-----|
| Nemlilik,maks. (%)                                                                       | 0.5  | 3.0    | 3.0    | -       | -   |
| K.K, maks. (%)                                                                           | 7.0  | 12.0   | 6.0    | 5.0     | 5.0 |
| SO <sub>3</sub> , maks. (%)                                                              | 2.5  | 5.0    | 5.0    | 3.0     | 3.0 |
| MgO, maks. (%)                                                                           | 4.0  | 5.0    | 5.0    | -       | -   |
| Alkaliler, maks. (%)                                                                     | -    | 1.5    | 1.5    | -       | -   |
| SiO <sub>2</sub> , min. (%)                                                              | -    | -      | 4.0    | -       | -   |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,min(%) | -    | 70     | 50     | -       | 70  |
| Serbest kireç, maks. (%)                                                                 | -    | -      | -      | 1.0-2.5 |     |
| Cl-, maks. (%)                                                                           | -    | -      | -      | 0.1     |     |
| PAI, min. (%)                                                                            | -    | 75     | 75     | 75(85)  |     |
| İncelik, ≥45 µm, maks. (%)                                                               | 12.5 | 34     | 34     | 40      |     |

### 3.2.6. Uçucu Küllerin Betona İkame Metotları

Birçok araştırmacı karışım oranları ve uçucu külün ikamesi ya da beton karışımına katılması konusunda çalışmalar yapmışlardır. Uçucu kül ikame metotları aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır. Önerilen bu metotlar esas olarak Abraham'ın su/çimento oranı ile dayanım ilişkisine dayanır, aralarında ise küçük farklar vardır.

1. Basit ikame metodu: Bu metotta, kontrol karışımının çimentosunun bir kısmı yerine hacimce veya ağırlıkça eşit miktarda uçucu kül konularak uçucu küllü beton üretilmektedir. Bu metot kolaylığından dolayı birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır.

2. Değiştirilmiş ikame metodu: Basit ikame metodu ile tasarımlanan beton karışımlarının erken dayanım düşüklüğü, araştırmacıları yeterli erken yaş dayanımı veren bir başka ikame metodu bulmaya itmiştir. Düşük erken yaş dayanımının üstesinden gelen ve basit ikame metodunu modifiye eden çeşitli yöntemler önerilmiştir.

Bütün metotlarda ortak göze çarpan özellik karışıma konan uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından fazla olmasıdır, uçucu külün fazla konulan miktarı ince agrega yerine kullanılır. Ayrıca su/çimento oranını azaltarak betonda mukavemet kaybı olmadan mümkün olduğunca çok uçucu kül kullanımını sağlayan değiştirilmiş bir ikame metodu önerilmiştir.

3. Rasyonel metodu: Rasyonel metot, uçucu küllü betonun şartnamelerdeki işlenebilirlik ve mukavemet şartlarıyla uyuşması gerektiği gerçeği, betonun bu özelliklerini etkileyen uçucu kül karakteristiklerini göz önüne almak gerektiğini ortaya koymuştur.

### **3.3. Uçucu Küllerin Beton Özellikleri Üzerine Etkileri**

Uçucu külün beton karışımında kullanımı taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini oldukça etkiler. Taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirliği, priz zamanı, bitirilebilme özelliği, hidratasyon ısısı ve kanama uçucu külün kullanımı sonucu etkilenir. Katılaşmış betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de uçucu külün beton karışımında kullanılmasıyla etkilenen önemli özellikleridir. Uçucu küllerin beton özellikleri üzerine olan etkileri aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir (Erdoğan, 1997; Bilim, 2001; Atış, 2001).

#### **3.3.1. Su İhtiyacı ve İşlenebilirlik**

Genellikle, çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül konularak kullanılması betonun su ihtiyacını, uçucu külsüz olarak üretilecek betona göre aynı slump değeri için azaltmaktadır. Uçucu külün su ihtiyacını azaltmaktaki rolü esas olarak inceliğine dayanmaktadır. İnceliğin artması su ihtiyacını arttırırken, küresel şekillenmiş olan taneler içsel sürtünmeyi azaltmaktadır, dolayısıyla su ihtiyacında azalma olmaktadır. Bu nedenle beton karışım oranları su ihtiyacı üzerinde etkin rol oynar. Uçucu külün puzolanik reaksiyonundan yararlanarak çimento miktarı azaltılarak ve uçucu küllü betonlarda uçucu külsüz betonla aynı slump değerini elde etmek için su-çimento oranı azaltılır. Diğer taraftan uçucu kül ince agreganın yerine kısmi yerleşim yapılırsa su ihtiyacı yüksek olabilir.

Uçucu külün kullanımı bağlayıcı hamurun hacmini arttırır. Uçucu kül çimentonun kısmi bir yer değişimi ağırlık bazında yapıldığında, uçucu külün yoğunluğu çimentodan az olduğundan, yer değişimde bağlayıcı maddenin hacminde bir artış olmaktadır. Boşlukların yeterli miktarda bağlayıcı hamuru ile doldurulması sonucu yapışkanlık, plastiklik ve agrega tanelerinin kayganlığı sağlanır. Uçucu küllerin inceliği ve tanelerinin küresel olması işlenebilme üzerinde faydalı etkilere sahiptir. Küresel şekil agregalar arasındaki sürtünmeyi bilyalı-yatak etkisi ile azaltmakta ve betonun daha rahat hareket etmesini sağlamaktadır. İnce taneler boşlukların daha iyi dolmasını sağlar ve perdelamayı kolaylaştırır. Aynı zamanda uçucu külün tanelerinin küresel şekli, agregalar arasındaki sürtünmeyi azaltır, dolayısıyla beton ve pompa hattındaki sürtünmeyi azalttığından betonun pompalanabilirliğini arttırmaktadır.

### **3.3.2. Priz Süresi, Hidratasyon Isısı ve Kanama**

Betonun priz zamanı karakteristiği; çimento tipi, çimento miktarı, çimento inceliği, çimento hamurunun su muhtevası, eriyebilir alkaliler, diğer katkıların kullanımı, uçucu külün miktarı, inceliği ve bileşenleri gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Uçucu küllü beton, diğer bütün pozolanik betonlar gibi, daha uzun priz zamanına sahiptir. Uçucu külün priz zamanı üzerindeki etkisi uçucu külün karakteristiklerine ve kullanıldığı miktara bağlıdır. Uçucu kül betonlarının priz zamanının normal betona göre daha uzun olmasından dolayı, bu tür betonun bitirilmesi normal betona göre daha geç yapılmalıdır. Erken bitirme, kanama suyunu yüzeyin altında bırakabilir ve yüzeyde zayıflık oluşturabilir.

Uçucu kül ve portland çimentosunun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyon, çimentonun hidratasyonu işleminden daha yavaş bir işlemdir. Bu durum daha yavaş ısı oluşmasına ve beton içinde daha az iç gerilmeye ve daha az rötreye sebep olur. Uçucu külün bu özelliği onun özellikle baraj yapılarında kütle betonlarında ortaya çıkan yüksek ısıları kontrol etmede kullanılır.

Uçucu küllü beton karışımı genelde normal betona göre daha az kanama gösterir. Bunun nedeni ise, betondaki katı madde yüzey alanının su hacmine oranının artmasıdır. Uçucu küllü yapılan hamur daha az sulu ve ayrışmaya daha az meyillidir.



### 3.3.3. Dayanım

Beton karışımı içinde uçucu kül kullanımı genelde su ihtiyacını azaltmakta, bağlayıcı madde içeriğini artırmakta ve uzun dönemde pozolanik aktivite yoluyla dayanıma katkıda bulunmaktadır. Uçucu külün katılma oranının yavaş, ve erken yaşlarda basınç dayanımı kazanımını azalttığını bilinmektedir. Bu durum uçucu külün çimento ile kısmen yer değişimi yaptığı zaman geçerlidir ve bağlayıcı olarak görev görür. Eğer, bir beton karışımında bağlayıcı malzeme miktarı sabit ise ve bu bağlayıcı miktarının bir kısmı uçucu kül ile yer değiştirilmiş ise; basınç dayanımı uçucu kül miktarının artmasıyla daha da düşer. Diğer taraftan, uçucu küllü betonun dayanımı ve dayanım kazanma oranı kullanılan uçucu külün miktarına, karakteristiklerine ve kullanılan çimentoya kuvvetlice bağlıdır. Yüksek kireçli uçucu kül daha yüksek reaksiyon oranı ve yüksek dayanımı düşük kireçli uçucu küle nazaran erken yaşlarda gösterir. Genelde, bütün betonların dayanım ve dayanım kazanma oranı kür edilme zamanı tarafından etkilenmektedir. Uçucu küllü beton normal betona göre daha uzun kür edilme zamanı isteyebilir.

### 3.3.4. Dayanıklılık

Uçucu küllü betonun geçirgenliği genelde uçucu külsüz olarak yapılan betonun geçirgenliğinden daha düşüktür. Geçirgenliğin böyle düşük olmasının nedeni uçucu kül ile çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki pozolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır.

Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması ayrıca sülfat atağının beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, uçucu kül çimentonun bir kısmı ile yer değiştirildiğinde toplam  $C_3A$  miktarı azalacağından, oluşacak sülfat alüminatın meydana getireceği zararlı hacim genleşmelerini de azaltmaktadır.

Betonun donma çözünmeye karşı dayanıklılığı hava-boşluk sisteminin yeterliliğine, iri agreganın sağlamlığına, beton dayanımına ve donma anındaki nem

durumuna bağılıdır. Hava boşluk sistemi yeterli olduğu sürece yani yeterli hava kabarcıkları sürüklenmişse ve agrega dayanıklı ise, hava katkılı uçucu kül betonunun donma çözünme dayanımı uçucu külsüz aynı dayanıma sahip kontrol betonundan daha az değildir.

Çimentonun alkalileri ile agreganın reaktif silis bileşenleri arasında yer alan alkali agrega reaksiyonu sonucundaki genleşme ve çatlamlar, uçucu kül kullanılması ile azaltılabilmektedir.

Uçucu külün bağlayıcı hamurunun hacmini artırdığı durumlarda su miktarı sabit tutulduğu zaman rötreye de artış görülebilir. Bunun yanı sıra, uçucu kül ilavesi işlenebilirliği artırdığından sabit işlenebilirlik için su miktarı azaltılabilir, bu da rötreye artışı yok edebilir. Uçucu külün yüksek oranda kullanılması rötreyi azaltmaktadır.

### **3.3.5. Ekonomi**

Maliyet açısından bakıldığında, kullanılacak olan uçucu kül miktarı ve tipine göre değişecek olmakla birlikte, sabit bir mamul madde (çimento) miktarı için daha az klinker üretimi, tras ve cüruf gibi mineral katkılara kıyasla, zaten ince olan tane boyutları nedeniyle, daha az öğütme enerjisi gereksinimi ve yine tras ve cüruf gibi katkılarda gerekebilecek ön kurutmaya ihtiyaç göstermemesi uçucu küllü çimento üretimiyle sağlanacak olan tasarrufun gerekçeleridir. Ancak uçucu küllerin taşıma mesafeleri bakımından ele alınması gerektiği unutulmamalıdır (Tokyay ve Erdoğan, 1998).

Bunun yanı sıra, uçucu kül kullanımı ile işlenebilirlikteki iyileşme; karıştırmada ve yerleştirmedeki kolaylık dolayısıyla tasarruf sağlamaktadır. Uçucu külün beton özellikleri üzerine faydalı ve potansiyel bozucu etkileri Çizelge 3.4.' de özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Uçucu küllerin beton üzerindeki etkileri

| Faydalı Etkileri                             | Zararlı Etkileri                           |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Sabit su miktarında işlenebilirliği artırır. | Özellikle soğuk havalarda rötreyi artırır. |
| Kanamayı ve ayrışmayı önler                  | Yavaş dayanım kazanma sağlar.              |
| Uzun dönemde dayanımı artırır.               | Uzun süre küre ihtiyaç duyar.              |
| Rötreyi azaltır.                             | Hava sürükleyici katkısının artırır.       |
| Alkali-silika reaksiyonunu azaltır           |                                            |
| Sülfata karşı dayanımı artırır.              |                                            |
| Ekonomi sağlar.                              |                                            |

### 3.4. Uçucu Küllerin Kullanıldığı Yerler

Uçucu küller kimyasal, mineralojik, fiziksel ve puzolanik özellikleri sebebiyle inşaat sektörü tarafından pek çok alanda kullanılmaktadır, bu alanlar aşağıda özetlenmiştir (Erdoğan, 1995; Sevim, 2003).

#### 3.4.1. Çimento Üretimi

Uçucu küller çimentoya ham madde olarak, klinker ve alçı taşı ile birlikte öğütülerek veya mamul çimentoya doğrudan olmak üzere üç şekilde katılabilir. Bu tip çimento üretiminde, klinkere öğütülmüş uçucu kül katıldığından klinkerin öğütülmesi kolaylaşmakta, üretim kapasitesi ve rantabilite artmaktadır. Uçucu küller öğütülmüş kömürün yakılmasıyla elde edildiklerinden kendileri de öğütülmüş durumdadır. Bundan dolayı çimento üretiminde bir ön öğütme işlemine gerek kalmadan doğrudan fırına verilebilirler ve böylece öğütme işleminden tasarruf sağlanır. Uçucu kül doğrudan çimentoya katılarak ta uçucu küllü çimentolar elde edilebilir. Bu durumda uçucu külün klinkere katılmasıyla aynı sonuçlar elde edilmektedir. Portland uçucu küllü çimento (CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/AW ve CEM II/B-W) çimentolar 28 günlük basınç dayanımlarına göre; 32.5 N, 32.5R, 42.5 N, 42.5R, 52.5 N, 52.5R olmak üzere 6 çeşide

ayrılırlar. A tipi çimentolarda kütlece %6-20 oranında uçucu kül var iken, B tipi çimentolarda kütlece %21-35 oranında uçucu kül mevcuttur.

### **3.4.2. Beton Üretimi**

Beton üretiminde bağlayıcı madde olarak kullanılan Portland çimentosunun bir kısmı yerine mineral katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılabilmekte, böylece uçucu kül katkılı beton elde edilebilmektedir. Zaman zaman beton üretiminde kullanılan ince agreganın bir kısmı yerine de uçucu kül kullanılabilmektedir.

### **3.4.3. Tuğla ve Hafif Agregat Üretimi**

Uçucu külün tuğla imalinde kullanımı ise iki şekilde olmaktadır. Birincisi, uçucu küllerin çok rutubetli killerin fazla suyunu emmesi, plastik killerin çatlamasını, şişmesini ve çiçeklenme olayını önlemesinden dolayı yardımcı ve düzeltme malzemesi olarak kullanılırlar. Uçucu küllerin ikinci kullanım şekli ise esas malzeme olarak killere karıştırılıp basınç altında kalıplara yerleştirilen karışım ısıtılma tabii tutulmasıdır. Uçucu kül puzolanik özelliği ve inceliği sebebiyle pişmiş malzemede mukavemetin önemli miktarda artmasını sağlamaktadır.

Hafif betonun inşaat mühendisliğinde kullanılmasıyla birlikte, hafif agregat ile hafif beton üretme çalışmaları da başlamıştır. Bu amaçla uçucu kül belirli oranlarda su ile karıştırılarak sinterleştirilmekte ve istenilen irilikte doğal agregaya göre hafif bir malzeme elde edilmektedir. Bu şekilde elde edilen agregalarla üretilen betonlar, doğal agregalarla üretilen betonlar kadar dayanıklı olmakta, ayrıca hafif olması sebebiyle çok katlı binalarda işçilik ve temel masraflarının azaltılmasında, ısı ve ses yalıtımı sağlanmasında ve ateşe karşı dayanımda bazı üstünlükler sağlamaktadır.

### **3.4.4. Boşluklu Beton (Gaz Beton) Üretimi**

Boşluklu beton, çimento veya kireç ile uçucu kül karışımından hava ya da başka bir gaz geçirilmesi ile elde edilen hafif betondur. Boşluklu beton hafif olmasından dolayı taşımada kolaylık sağlar. Ayrıca ucuz olması, binanın hafifliği ve inşaat sırasında

işçi giderlerinde avantaj sağlamasından dolayı tercih edilmektedir. Uçucu küllü boşluklu betonlarda ısı iletkenliği kum-kireç-çimento karışımından daha düşük olmakta, mukavemet ise daha yüksek olmaktadır. Gaz beton, ince öğütülmüş silisli bir malzemenin kireç veya çimento ile birleştirilmesi, gözenekleştirici bir madde ile hafifletilmesi ve sertleşmesi ile elde edilen, birbirinden bağımsız hava hücreleri içeren hafif bir betondur. Elde edilen uçucu küllü gaz beton, hafif ve ısı iletkenliği düşük olacağından yapılarda kullanılması duvar kalınlıklarını azaltacak, böylece binaların yükü azalacaktır. Uçucu kül kullanılarak elde edilen gaz beton kuvars kullanılarak elde edilen gaz betondan daha dayanıklıdır. Bunun nedeni uçucu kül ile kireç arasındaki reaksiyondur.

#### **3.4.5. Yol, Zemin ve Baraj Uygulamalarında**

Yol yapımı ve geoteknik uygulamalarında uçucu küller, dolguların stabilizasyonunda, altyapı ve taban malzemesi olarak, alt drenaj tabakası olarak ve zemin enjeksiyonlarında kireçle birlikte kullanılmaktadır. Ayrıca yol alt tabakalarında ve baraj yapımında, çok düşük çimento dozajı ile hiç çökme vermeyen ve titreşimli yol silindirlerini taşıyacak kadar kuru ve bu araçlarla sıkıştırıldıklarında alt tabakalara yapışacak kadar nemlenen silindirle sıkıştırılmış beton kullanılmaktadır. Bu betonlarda bağlayıcı dozajı seçilen yapım sistemine göre 100- 150 kg/m<sup>3</sup> ten başlamaktadır. Bağlayıcı içindeki puzolan yüzdesi ise yine yapım sistemine göre %20-%80 arasında değişebilmektedir. Puzolan olarak özellikle uçucu kül kullanılmaktadır.

#### **3.5. Yöntem**

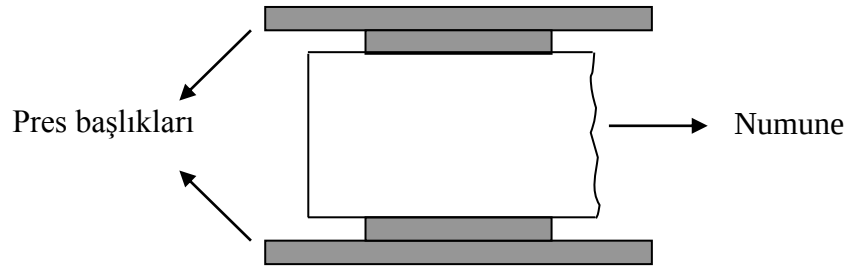
Araştırma amacı doğrultusunda hazırlanan uçucu küllü numuneler ve uçucu külsüz kontrol numunesi olmak üzere toplam 5 grup beton üzerinde taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler ve hazırlanan numune boyutları Çizelge 3.5.' de gösterilmiştir.

### 3.6. Deneysel Çalışmalar

Çizelge 3.5. Sertleşmiş beton deneyleri

| Deneyler                    | Numne Boyutları    |
|-----------------------------|--------------------|
| Eğilmede Çekme Dayanımı     | 100×100×400mm      |
| Basıncı Su Geçirgenliği     | 150×150×150mm      |
| Ultrasonik Ses              | 100×100×100mm      |
| Basıncı Dayanımı            | 100×100×100mm      |
| Sıcaklık Etkisi             | 100×100×100mm      |
| Su Emme                     | 100×100×100mm      |
| Kılcal Su Emme (Kapilarite) | 100×100×100mm      |
| Aşınma                      | 100×100×100mm      |
| Gaz Geçirimsizliği          | 50×150mm(silindir) |
| Yarmada Çekme Dayanımı      | 150×150×150mm      |
| Elastisite Modülü           | 100×100×100mm      |

#### 3.6.1. Basıncı Dayanımı Deneyi



Şekil 3.1. Basıncı deneyi

Betonun tek eksenli basınç dayanımı ve basınç gerilmeleri altında gerilme-deformasyon davranışı normal olarak, tek bir eksende yüklenmiş silindir veya prizma örneklerin eksenel basınç deneyi kullanılarak bulunur.

Ancak pratikte çoğu beton iki ya da daha fazla eksenle basınç, kesme, çekme gerilmeleri kombinasyonuna aynı anda maruz kalır. Tek eksenli basınç deneyi laboratuvarlarda gerçekleştirilecek en kolay deneydir ve standart tek eksenli basınç deneyi ile bulunacak betonun 28 günlük basınç dayanımı tüm dünyada kabul edilmiş beton dayanımının genel tanımlamasıdır.



Şekil 3.2. Beton basınç deneyi düzeneği

Eş dağılımlı gerilme sağlanamadığı taktirde, pürüzlü yüzeylerde doğabilecek kayma gerilmeleri nedeniyle örnek, beklenenin çok altında dayanım gösterir. Basit basınç deneyi aslında görüldüğü gibi kolay değildir. Yükleme hızı, örnek boyutları da deney sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Örneğin basınç dayanımı  $f_c$  ise, kırılma yükü  $P$ 'nin örnek kesit alanına (  $A$  ) bölünmesi ile elde edilir:

$$f_c = P/A \text{ 'dır.} \quad (3.1)$$

### 3.6.2. Elastisite Modülü Tayini

Betonun basınç dayanımı ile elastiklik modülü arasındaki ampirik ilişkiyi gösteren ve aslında birbirine oldukça yakın sonuçlar veren değişik formüller mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılan aşağıdaki kuruluşlar tarafından önerilen formüllerdir:

- Amerikan Beton Enstitüsü Formülü
- Avrupa Beton Komitesi Formülü
- Türk Standartları Formülü

Türk Standartları Enstitüsü (TSE) Tarafından Önerilen Formülü Kullanılarak Betondaki Elastiklik Modülü Değerinin Hesaplanması: TS 500 tarafından önerilen formül aşağıdaki gibidir (TS 500, 2000).

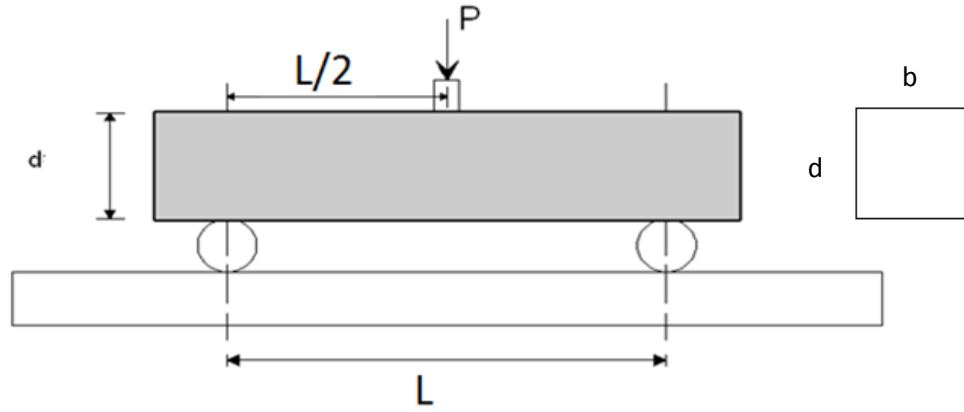
$$E = 14000 + 3250 \sigma^{1/2} \quad (3.2)$$

Burada,

$E$  = Elastiklik modülü, MPa

$\sigma$  = Betonun karakteristik basınç dayanımı, MPa

### 3.6.3. Eğilme ( Eğilmede Çekme ) Dayanımı Deneyi



Şekil 3.3. Eğilme deneyi

Beton kirişlere eğilme yüklerinin uygulanması ile eğilme dayanımının ve dolaylı olarak çekme dayanımının elde edildiği bir yöntemdir. Bu yöntemde, prizmatik beton örnekleri iki mesnet üzerine yerleştirilir ve ortadan tekil veya üçte bir açıklıklardan çift tekil yük uygulanarak, eğilme etkisi yaratılıp örnekler kırılmaktadır.

Bu deneyde donatı içermeyen beton bir kirişi eğmek üzere, göçme gerçekleşene kadar iki noktadan veya tek noktadan yükleme yapılır.





Şekil 3.4. Eğilme dayanımı deneyi düzeneği

Betonun eğilme dayanımı tayini TS EN 12390-5 (2002) ve TS 10515 (1992) standartlarına göre bu deney metodunda açıklığın 1/2 noktalarında yüklenmiş donatısız beton kirişlerde basit kiriş metodu ile yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için 100×100×400 mm' lik kiriş numuneleri üretilmiştir. Numunelerin zamanla göstereceği 28 günlük dayanımları ölçülmüştür. 400 mm uzunluğundaki kiriş numune 380 mm açıklığındaki mesnetler üzerine yerleştirilmiş ve orta noktasından tekil yük uygulanmıştır. 2 ton eğilme kapasiteli preste, yükleme 28 günlük eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme dayanımı, aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$F_{cf} = F \times L / (d1 \times d2^2) \quad (3.3)$$

Burada;

$F_{cf}$  : Eğilme dayanımı, MPa

$F$  : En büyük yük, N

$L$  : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm

$d1$   $d2$  : Numunenin en kesit boyutları, mm

#### 3.6.4. Su Emme Oranları Tayini Deneyi

Sertleşmiş betonda boşluk ve su emme oranlarının tayini TS 3624'e (1981) uygun olarak her bir grup için 28 günlük suda kür edilmiş 100×100×100 mm'lik küp numuneler üzerinde yürütülmüştür. Küp numunelerin sırasıyla etüv kurusu ağırlıkları,

su içinde tutulduktan sonra suya doygun ağırlıkları ve su içindeki ağırlıkları tayin edilmiştir. Hesaplanan ağırlıklar, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\text{Su emme Oranı (\%)} = [(W_{\text{DYK}} - W_K) / (W_K)] \times 100 \quad (3.4)$$

Burada;

$W_K$ : Fırın kurusu ağırlığı, g

$W_{\text{DYK}}$ : Kuru yüzey doygun ağırlığı, g

### 3.6.5 Kapiler Su Emme Katsayısı Tayini Deneyi



Şekil 3.5. Kapilarite katsayısı deneyi düzeneği

Beton numunelerin kapiler su emme durumunun belirlenmesi 100x100x100 mm' lik numuneler üzerinde yapılır. Öncelikle numuneler 24 saat boyunca 105°C 'deki etüvde fırın kurusu haline getirilir. Fırın kurusu ağırlıkları tartıldıktan sonra her bir deney numunesi için beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden dolayı beton numunelerin yan yüzeyleri ısıtılmış parafin ile izole edilmiştir. Parafinli ağırlıkları da tartıldıktan sonra su yüksekliği yaklaşık olarak 5 mm olan deney düzeneğine yerleştirilmişlerdir. Deney numuneleri 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121, 144. dakikalarda su emme miktarları ölçülmüştür. Ölçülen değerlerden her bir dakikadaki su emme miktarları (Q) hesaplanmıştır. Emilen su miktarının temas eden yüzey alanına bölümünün oranı ile (Q/A) ve geçen zamanın (t) saniye cinsinden değerinin kara kökü arasında lineer bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiye ait elde edilen eğim bize beton numunelerin kapiler su emme katsayılarını vermiştir. Kapiler su emme kanuna göre;

$$Q/A=K \times t \quad (3.5)$$

Burada;

Q: Emilen su miktarı, cm<sup>3</sup>

A: Su ile temas eden yüzey alanı, cm<sup>2</sup>

t: Geçen zaman, sn

K: Kapilarite katsayısı, cm<sup>2</sup>/s

### 3.6.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi



Şekil 3.6. Sıcaklık etkisi deneyi düzeneği

Sıcaklığın artışına bağlı olarak serbest suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, pas payı tabakasının çatlamasına ve parçalanarak dökülmesine yol açar. Burada sıcaklığın artış hızının da önemli bir parametre olduğunu belirtmek gerekir. 300°C' yi aşan sıcaklıklarda normal şartlarda buharlaşmaya bağlı suların da uçması hasarın mertebesini artırır. Beton basınç dayanımında düşüşler görülmeye başlar. 400°C' yi aşan sıcaklıklarda ise CSH' ların tahrip olmaya başladığı, betonun dayanımının hızla azaldığı, 900°C civarında ise CSH yapısının tamamen dağıldığı görülür (Baradan, 2010).

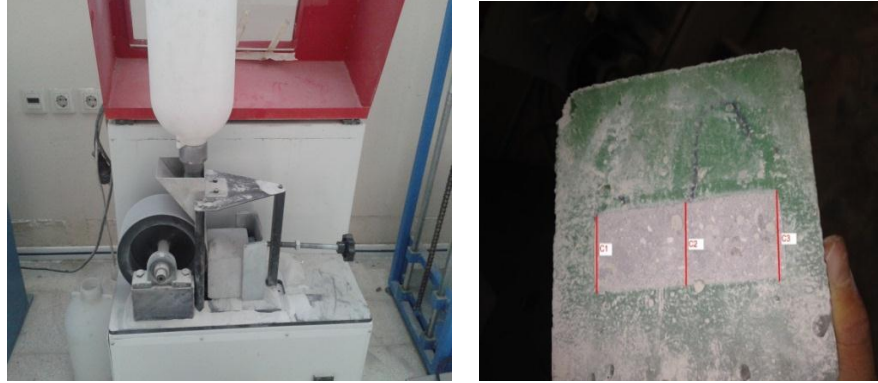
Çimento hamurunda bulunan diğer bir bileşen  $\text{Ca(OH)}_2$  ' dir.  $\text{Ca(OH)}_2$  ' in sönmemiş kirece ( $\text{CaO}$ ) dönüşmesi ise  $400^\circ\text{C}$  civarında oluşur. Teknik literatürde bu değişimin  $530^\circ\text{C}$  ' de görüldüğünü ifade eden yayınlarda mevcuttur. Beton içindeki kirecin, sönmemiş kirece dönüşmesi yaklaşık %33 civarında bir büzülme olması anlamına gelir. Yangını söndürmek için sıkılan su oluşan  $\text{CaO}$  ' in tekrar  $\text{Ca(OH)}_2$  ' e dönüşmesine neden olmaktadır. Bu durum %44 oranında bir hacim artışı meydana getirir. Kısa sürede büzülen ve genleşen beton içinde oluşan parazit gerilmeler hasarın büyümesine neden olur. Bu esnada boşluklu bir yapıya sahip olan betondan dışarıya  $\text{Ca(OH)}_2$  süzülür. Yangın geçirmiş betonarme yapılarda yapılan incelemelerde beton bünyesinde oluşan değişimler aşağıdaki gibi özetlenmiştir (Baradan, 2010).

Çizelge 3.6. Sıcaklığın artışının beton üzerinde oluşturduğu etkiler

| Sıcaklık  | Beton üzerindeki etkisi                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 100-150°C | Kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, jel boşluklarındaki suyun buharlaşması      |
| 150-250°C | Büzülme, kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş, pembemsi renk          |
| 250-300°C | Alüminli ve demir oksitli bileşenlerde bünye suyunun kaybı, basınç dayanımında düşüş |
| -400°C    | $\text{Ca(OH)}_2$ ' den $\text{CaO}$ ' e dönüşüm (% 33 hacim azalması)               |
| 400-600°C | CSH yapısının tahribi, gri beyaz renk, dayanımında %80' lere varan azalma            |

Çalışmamda  $100 \times 100 \times 100$  mm' lik numuneler hazırlanıp  $105^\circ\text{C}$  ' de 24 saat süre ile etüvde kurumaya bırakılmıştır. Etüv kurusu numuneler yüksek sıcaklıklı fırında 2 saat süre ile sırasıyla  $250$  ve  $750^\circ\text{C}$  sıcaklığa maruz bırakılmıştır. 2 saat sonunda dayanımlarında meydana gelen azalmaları ölçmek üzere basınç cihazıyla test edilmiştir.

### 3.6.7. Aşınma Deneyi



Şekil 3.7. Aşınma dayanımı deney düzeneği

Betonların aşınma direnci; düşey aşındırma cihazı üzerinde 100x100x100 mm’lik küp numunelere sürtünme yolu ile aşınma deneyi TS 699’a (2000) uygun olarak yapılmıştır. Aşınma kaybı, numunenin kütleindeki veya hacmindeki azalma olarak tayin edilmiştir. Küp numuneler deneye başlamadan önce numune üzerinde tespit edilen toplam 3 noktadan yükseklik ölçümü alındıktan sonra, beton numunenin aşındırılacak yüzeyi döner disk üzerine yapışacak ve temas yüzü yukarı gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Baskı pistonu yükleme koluna asılan ağırlık vasıtası ile bastırılmıştır. Sürtünme yolu üzerine standart aşındırıcı olarak 20 gr suni korundum tozu yayıldıktan sonra cihaz çalıştırılır. Bu durumda disk numuneye 294 N ’luk aşındırma kuvveti uygulamıştır. Disk 75 devirden sonra (1 periyod sonunda) otomatik olarak durur. Numune saat yönünde 90° döndürülür ve ize yeni aşındırıcı konulur. Her defasında disk ve temas yüzeyi temizlenir. Bu şekilde ikinci, üçüncü ve dördüncü yüzleri de aşındırılır ve toplam 300 devir yani 4 periyod sonunda birinci aşama tamamlanır. Her periyod sonunda fırça ile temizlenen numuneler dikkatlice ölçülmüş ve tartılmıştır. Numunenin hacmi Arşimet deneyine göre belirlenmiş ve ilk hacmi ile olan fark aşınma kaybı olarak bulunmuştur. Her dört dönüşümden sonra temizlenen numuneler dikkatlice ölçülmüş ve tartılmıştır. Araştırmada her numune üzerinde toplam 16 periyod 900 devir uygulanmıştır. Aşınma kaybı hacim azalması cinsinden aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\Delta V = (V_o - V_f) / A \times 50 \quad (3.6)$$

Burada;

$\Delta V$ : Numunenin yüzey aşınma kaybı değeri,  $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$

$V_0$ : Numunenin deneyden önceki hacmi,  $\text{cm}^3$

$V_1$ : Numunenin deneyden sonraki hacmi,  $\text{cm}^3$

$A$ : Numunenin aşınma uygulanan yüzeyin alanı,  $\text{cm}^2$

Ayrıca betonların aşınma kaybı tayini için alternatif bir yol olabileceği düşünülerek, agregaların parçalanma direncinin tayinini gibi TS EN 1097-2 (2000) standardına göre Los Angeles deney metodu ile yapılmıştır. 100x100x100 mm'lik küp numuneler tamburda çelik bilyalar konmaksızın önce 75 devir daha sonrada toplamda 375 devir yaptırılmıştır. Çarpma sonucunda aşınmış olan beton numuneler tartılarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır:

$$P = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 100 \quad (3.7)$$

Burada;

$P$ : Aşınma kaybı, %

$W_1$ : Numune ilk ağırlığı, g

$W_2$ : Numune son ağırlığı, g, (Karahan, 2006).

### 3.6.8. Ultrasonik Ses Deneyi



Şekil 3.8. Ultrasonik ses deneyi düzeneği

Herhangi bir beton bloğunun bir yüzüne ultrasonik puls (nabız atışı gibi ritmik ses üstü vuruşlar) uygulanarak, betonun içerisinde basınç dalgaları yaratılmaktadır. Betonun içerisinde ilerleyen ses üstü dalgalar, beton bloğun bir başka yüzeyinden geri alınmaktadır (kaydedilmektedir). Ultrasonik test cihazı, ses üstü dalganın, betona gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki mesafeyi ne kadar zaman süresinde geçtiğini ölçmektedir.

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülmekte, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan sesüstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir. Ultrasonik ses cihazı ile ölçüm yapabilmek için belirli boyutlardaki numunenin kullanılması şart değildir. Ultrasonik test cihazı ile yapıdaki betonun basınç dayanımı ölçülebilmektedir. Ultrasonik test yönteminin uygulanması durumunda, ölçüm yapılan betonda çatlama veya kırılma oluşmamaktadır. Bu yöntem, ‘‘hasarsız deney yöntemi’’ dir. ASTM C 597 no.lu standart’da, ultrasonik test yönteminin uygulanmasında kullanılan cihazın özellikleri ve kullanım tekniği belirtilmektedir (Turhan ve Erdoğan, 2003).

Katı bir malzemenin içerisinde geçen sesüstü dalgaların hızı (V), sesüstü dalganın içerisinde geçtiği malzemenin elastiklik modülü (E) ve malzemenin yoğunluğu (D) ile ilgilidir,  $V^2 \propto E/D$  olarak gösterilmektedir. Ultrasonik test cihazı, bu ilişkiden yararlanılarak geliştirilmiştir.

Beton bloğun bir yüzeyinden içeriye gönderilen sesüstü dalganın, bloktaki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = ( S / T ) 10^6 \quad (3.8)$$

Burada;

V= Ses üstü dalga hızı, m/sn

S=Beton bloğun sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın bloktaki diğer yüzeyi arasındaki mesafe, m

T= Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman, mikrosaniye

Çizelge 3.7. Ultrasonik test yöntemiyle beton kalitesinin değerlendirilmesi

| Dalga Hızı, m/saniye | Beton Kalitesi |
|----------------------|----------------|
| >4500                | Mükemmel       |
| 3500-4500            | İyi            |
| 3000-3500            | Şüpheli        |
| 2000-3000            | Zayıf          |
| 2000<                | Çok Zayıf      |

### 3.6.9. Basıncılı Su Geçirgenlik Deneyi



Şekil.3.9. Basıncılı su geçirgenliği deney düzeneği

Su geçirirmliliğinin ölçülebilmesi için genellikle kullanılan yöntem aşağıda açıklanmaktadır:



Geçirimsizlik deneyinde kullanılmak üzere, 150×150×150 mm boyutlu beton küp numuneler üretildi. Cihazının kapasitesi sayesinde bir seferde altı adet numune test edilebilmektedir. Sızdırmayacak düzgün yüzeylerinden uygun şekilde yerleştirilen numuneler geçirimsiz duruma getirilir ve cihaz düzeneğindeki başlıklar arasına yerleştirilir. Her numunenin yüzeyi borular vasıtasıyla su dolu bir rezervuara bağlanmaktadır. Böylece, numunenin yüzeyine basınçlı su uygulanmakta ve betonun içerisinde ilerleyen suyun rezervuardaki azalmaya göre miktarı ölçülebilmektedir.



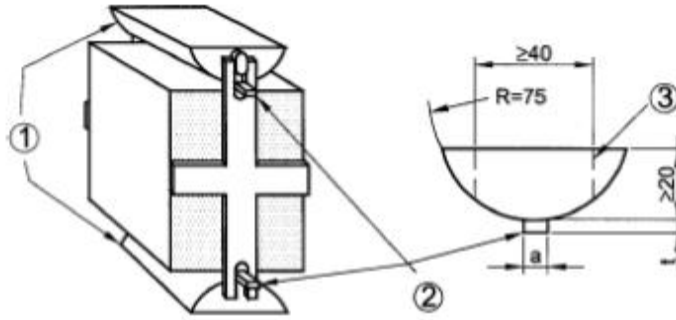
Şekil 3.10. Basınçlı su geçirgenliği deneyi su işleme derinliği ölçümü

Deneyi kısaca anlatacak olursak, numuneler test cihazına düzgün yüzeyleri temas edecek şekilde yerleştirildikten sonra su kaçırmamasını önlemek amacıyla üstteki kollar vasıtasıyla iyice sıkıştırılmalıdır. Betona etkiyecek sular rezervuara doldurulmalı doldurulan seviye deney sonunda azalmayı ölçmek için not edilmelidir. Rezervuarları doldurduktan sonra deneye başlamadan önce test cihazının içindeki hava alınmalıdır. Test cihazı 5 bar basınca ayarlanarak numunelere basınçlı su etkisine maruz bırakılır. Deney 72 saat boyunca süreceği için basınçta herhangi bir azalma olmaması için hava

komprasörü ayarlanmalı, elektriğe bağlı olmalı basınç azaldığında otomatikman devreye girmelidir.

72 saat sonunda deney düzeneğine verilen basınçlı su sistemi uygulaması kapatılır. Basınçlı hava ve su sistemden boşaltılır. Numuneler kollar gevşetilerek yerinden çıkarılır. Basınç cihazında ikiye yarılarak su işleme derinlikleri kumpas yardımıyla ölçülür. Basınçlı su geçirgenliği deneyinde azalan su miktarı belirlenebildiği gibi numune üzerinde sağlıklı sonuçlara numuneyi yarıdıktan sonra su ilerleme derinliği ölçülerek varılabilir.

### 3.6.10. Yarma Dayanım Tayini Deneyi



Şekil 3.11. Küp yarma deneyi

Silindir, küp veya prizma şeklindeki deney numuneleri uzun eksenine paralel olarak basınç yükü uygulanarak ortadan yarılarak dolaylı olarak betonun çekme dayanımı yarma deneyi belirlenmektedir. Yarma deneyi Brezilya deneyi olarak da bilinmektedir. Yarma deneyinde basınç dayanımı bulmak için kullanılan beton presi kullanılmaktadır.



Şekil 3.12. Yarma dayanımı deney düzeneği

TS EN 12390-6' a uygun yarmada çekme dayanımını belirlemek için, numunelerin yüzeyindeki fazla su silinerek temizlenmelidir. Sabitleme cihazı, sıkıştırma şeritleri, yükleme parçaları ve başlıklarının yükleme temas yüzeyleri silinerek temizlenmelidir.

Sıkıştırma şeritleri numunenin yükleme düzleminde üst ve alt kısmı boyunca dikkatlice yerleştirilmelidir. Makinenin alt ve üst yükleme başlıklarının, yükleme esnasında birbirine paralel olması sağlanmalıdır. Yükleme hızı, 0,04 MPa' a yuvarlatılarak gösterilmelidir ve aşağıdaki formüller ile hesaplanmaktadır.

Silindir için  $\sigma_{yç} = 2P / \pi DL$  (3.9)

Küp için  $\sigma_{yç} = 2P / \pi a^2$  (3.10)

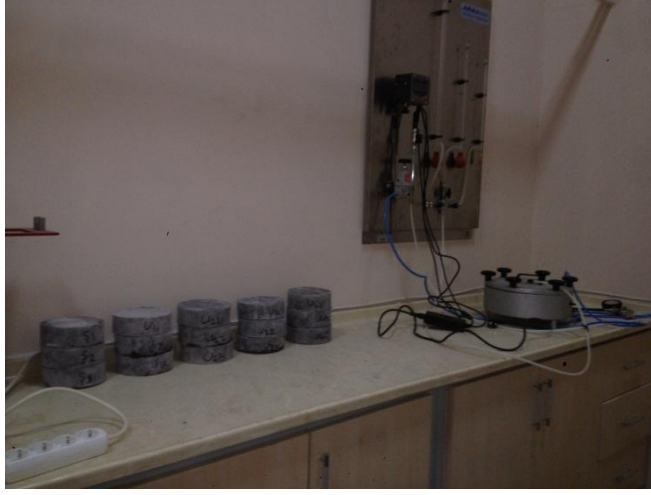
$\sigma_{yç}$  :Yarmadan dolayı çekme dayanımı

P :En büyük kırılma yükü

D :Numunenin çapı

L :Numuneni boyu

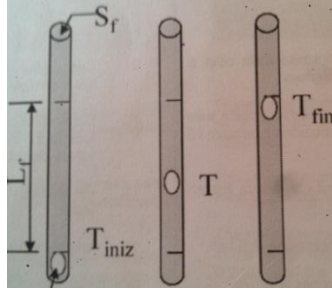
### 3.6.11. Gaz Geçirimsizlik Deneyi



Şekil 3.13. Beton gaz geçirgenlik tayini deney düzeneği

Betonun gaz geçirgenlik tayini deneyi için hazırlanan silindir numune basınç test kazanına sığacak şekilde yaklaşık 5 cm boyunda kesilir. Numune test kazanına yerleştirildikten sonra etrafını çevreleyen lastik şambrelinin düzgün yerleştirilip yerleştirilmediği kontrol edilir. Daha sonra test kazanının kapağı kapatılarak üzerindeki cıvatalar hava kaçırmaması için sıkılır. Daha sonra deney düzeneğine bağlanan oksijen tüpü 10 barı geçmeyecek şekilde basınç ayarlanarak açılır. Deney test kazanı içindeki betonun etrafından hava kaçırmaması için şambrel 6 bara kadar şişirilir.

Betondan geçen oksijen gazı miktarı kazana bağlı olan tüp üzerinde, içine sabun köpüğü koyularak meydana gelen yükselme faktörlerini kullanarak beton geçirgenlik katsayısı (K) hesaplanır. Fakat K sayısını bulmak için önce tüpten geçen gaz debisi bulunur. Gaz debisi ise belirlenen mesafede geçen gazdan kaynaklı köpüğün yükseldiği süre önce sayesinde hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.14. Gaz geçirgenlik debisi hesap düzeneği

$$V_f = S_f \times L_f \quad ;(3.11)$$

$$Q_f = V_f / (T_{fin} - T_{iniz}) \quad (3.12)$$

Burada ;

$S_f$  = Tüpün alanı

$Q_f$  = Geçen Gaz debisi

$L_f$  = Sabit tutulan tüp yüksekliği

$V_f$  = Tüpün hacmi 'dir.

K geçirgenlik katsayısının hesabı ise elde edilen  $Q_f$  ,betona uygulanan gaz basıncı, atmosfer basıncı, ve numune kesit alanı kullanılarak hesaplanır;

Burada ;

K = Gaz geçirgenlik katsayısı,

$P_a$  = Atmosfer basıncı

P = Numuneye etkiyen basınç

A = Numune kesit alanı

H = Numune yüksekliğidir.

### **3.7. Deneysel Çalışmalarda Kullanılacak Malzemeler ve Özellikleri**

#### **3.7.1. Çimento**

Çalışmada Kahramanmaraş Narlı Çimento tarafından üretilen standart CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri TS 639, (1998) standardına uygun, başlangıç ve bitiş priz süresi 2.18 ve 3.23 saattir. Çimentonun yoğunluğu  $3.16 \text{ g/cm}^3$  olup, Blaine özgül yüzeyi ise  $3250 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dır.

Çizelge 3.8. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

|                     | Bileşen                            | Değerler | TS 19 Sınırlar (%) |
|---------------------|------------------------------------|----------|--------------------|
| Kimyasal Özellikler | SiO <sub>2</sub> (%)               | 20.10    |                    |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 5.40     |                    |
|                     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 3.73     |                    |
|                     | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 0.11     |                    |
|                     | CaO (%)                            | 63.30    |                    |
|                     | MgO (%)                            | 2.54     | 5.0 max            |
|                     | SO <sub>3</sub> (%)                | 2.82     | 3.5 max            |
|                     | K.K (%)                            | 0.96     | 4.0 max            |
|                     | Na <sub>2</sub> O (%)              | 0.25     |                    |
|                     | K <sub>2</sub> O (%)               | 0.90     |                    |
|                     | Erimez Kalıntı (%)                 | 0.23     | 1.5 max            |
|                     | Serbest CaO (%)                    | 0.78     |                    |
|                     | Cl- (%)                            | 0.0115   | 0.1 max            |
| Fiziksel Özellikler | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3.16     |                    |
|                     | Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 3250     | 2800 min           |
|                     | 0,200 mm elekte kalıntı (%)        | 0.0      |                    |
|                     | 0,090 mm elekte kalıntı (%)        | 0.3      |                    |
|                     | Hacim Sabitliği (mm)               | 1.0      | 10 min             |
|                     | Litre Ağırlığı (g/L)               | 970      |                    |
|                     | Priz Başlangıç Süresi (dak)        | 130.8    | 60 min             |
|                     | Priz Final Süresi (dak)            | 193.8    | 600 max            |

### 3.7.2. Uçucu Kül

Bu çalışmada, Yumurtalık/Adana Sugözü termik santralinin ithal taş kömürünün yakılmasıyla açığa çıkan F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır.

Sugözü uçucu külü, ASTM C618 (1998) standardına göre SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> değerinin %70'in üzerinde olması ve CaO miktarının %10'dan az olması nedeniyle F

sınıfı (düşük kireçli) uçucu kül sınıfına girmektedir. Uçucu külün yoğunluğu 2.31 g/cm<sup>3</sup>, Blaine özgül yüzeyi ise 3000 cm<sup>2</sup>/g' dır.

Çizelge 3.9. Uçucu külün kimyasal özellikleri

| Oksit                          | Kül (%) | TS EN 450 | TS EN 197-1 |        | TS 639 | ASTM C 618 |        |
|--------------------------------|---------|-----------|-------------|--------|--------|------------|--------|
|                                |         |           | V           | W      |        | F          | C      |
| SiO <sub>2</sub>               | 58.25   |           |             |        |        |            |        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.95   |           |             |        |        |            |        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.25    |           |             |        |        |            |        |
| S+A+F                          | 80.66   |           |             |        | >70.00 | >70.00     | >50.00 |
| CaO                            | 2.58    |           |             |        |        |            |        |
| MgO                            | 2.42    |           |             |        | <5.00  |            |        |
| SO <sub>3</sub>                | 0.27    | <3.00     |             |        | <5.00  | <5.00      | <5.00  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.99    |           |             |        |        |            |        |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.06    |           |             |        |        |            |        |
| K.K                            | 3.23    | <5.00     | <5.00       | <5.00  | <10.00 | <12.00     | <6.00  |
| Cl-                            | 0.003   | <0.10     |             |        |        |            |        |
| S. CaO                         | 0.10    | <1.00     |             |        |        |            |        |
| R. SiO <sub>2</sub>            | -       | >25.00    | >25.00      | >25.00 |        |            |        |
| R. CaO                         | -       |           | >10.00      | >10.00 |        |            |        |
| Nem                            | 0.07    |           |             |        |        | <3.00      | <3.00  |



### 3.7.3. Su

Deneylerde kullanılan karışım ve kür suyu İskenderun şehir şebekesinden alınan içme suyudur. Beton karışım ve kür suyunun kalitesi ile ilgili özel bir Türk Standardı yoktur. Kaynaklarda karma suyu, genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

### 3.7.4. Akışkanlaştırıcı ve özellikleri

Deney çalışmalarında hazırlanan karışımların çökme değerleri  $15 \pm 2$  cm olacak şekilde ASTM C 494 standardına uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcıya ait özellikler Çizelge 3.10.' da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Akışkanlaştırıcı madde özellikleri

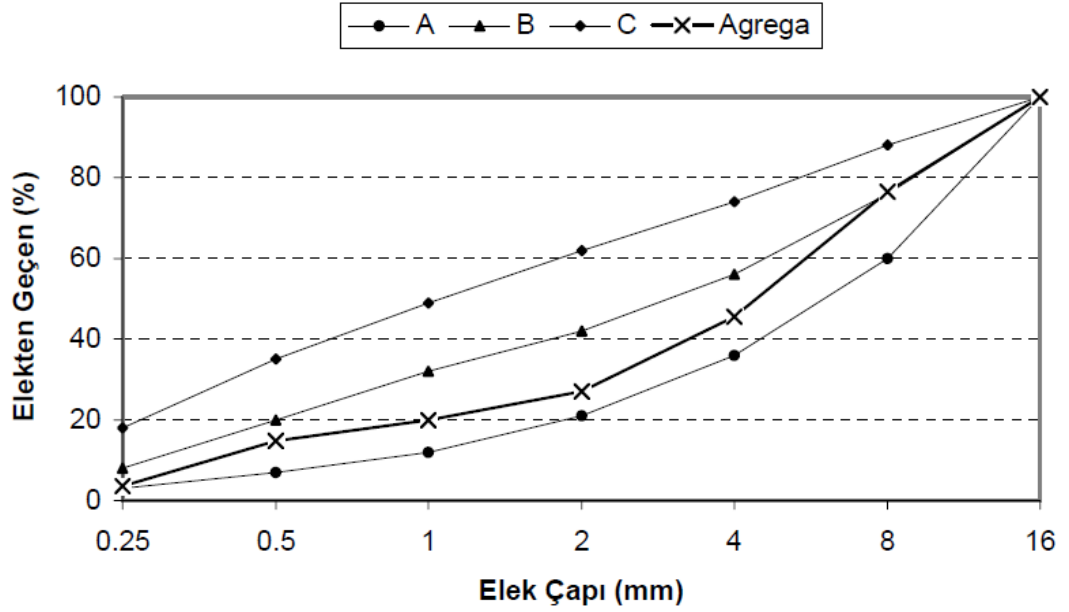
|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| Malzemenin Yapısı            | Polikarboksilik Eter Esaslı |
| Renk                         | Opak                        |
| Yoğunluk                     | 1,063 – 1,103 kg/litre      |
| Klor İçeriği ( EN 480-10 )   | < 0,1                       |
| Alkali İçeriği ( EN 480-12 ) | < 3                         |

### 3.7.5. Agrega

Beton üretiminde, Hatay İskenderun sınırları içerisinde yer alan taş ocakları tesislerinden elde edilen dolomitik kireçtaşı orijinli agrega kullanılmıştır. Karışımlarda, ağırlıkça tane çapı 0–4 mm olan agregadan % 40, tane çapı 4–11 mm olan agregadan % 30 ve tane çapı 11–22 mm agregadan % 30 oranında kullanılmıştır. Agregalara ait yoğunluk değerleri, 0-4 mm için  $2.67 \text{ kg/dm}^3$ , 4-11 mm için  $2.72 \text{ kg/dm}^3$ , 11-22 mm için  $2.75 \text{ kg/dm}^3$  tür. Ağırlıkça su emme değerleri, 0-4 mm için % 0.32, 4-11 mm için % 2, 11-22 mm için % 0.52' dir. Çizelge 3.11.' de, karışık agrega, granülometri eğrisi ise Şekil 4.1.' de sunulmuştur.

Çizelge 3.11. Karışık agregâ granûlometrisi ve TS 706 standart sınırları

| Elek Açıklığı (mm) | Elekten Geçen Miktar (%) |                   |                  | Kullanılan Agregâ |
|--------------------|--------------------------|-------------------|------------------|-------------------|
|                    | TS 706 Alt Sınır         | TS 706 Orta Sınır | TS 706 Üst Sınır |                   |
| 16                 | 100                      | 100               | 100              | 100               |
| 8                  | 60                       | 76                | 88               | 80,28             |
| 4                  | 36                       | 56                | 74               | 58,36             |
| 2                  | 21                       | 42                | 62               | 40,04             |
| 1                  | 12                       | 32                | 49               | 26,86             |
| 0.5                | 7                        | 20                | 35               | 16,96             |
| 0.25               | 3                        | 8                 | 18               | 12,22             |



Şekil 3.15. Agregânın granûlometri eğrisi

### 3.8. Hazırlanacak Numune Tipleri

Deneyler, Sugözü uçucu külü içeren ve içermeyen beton karışımlar üzerinde yürütülmüştür. Deneylerde 0.45 s/ç oranında 400 dozlu beton numuneler kullanılmıştır.

Çalışmalar bu numuneler üzerinde yürütülmüştür. Uçucu külün değişim yüzdesi %0, %10, %20, %30, %40 olup çimentonun yer değişimi şeklindedir. Böylece kontrol ve uçucu kül katkılı toplam 5 farklı beton grubu hazırlanmıştır.

### 3.9. Beton Karışım Oranları

Bu çalışmada, bağlayıcı (çimento + uçucu kül) dozajı birim metreküp için 400 kg' dır. Su/bağlayıcı oranı 0.45'tir. Deneysel çalışmalarda hazırlanan karışımların çökme değerleri  $15 \pm 2$  cm olacak şekilde ASTM C 494 standardına uygun süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Beton karışımlarında F tipi uçucu kül çimento ile ağırlıkça %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. 1 m<sup>3</sup> beton için karışım dizaynı Çizelge 3.12.'de verilmiştir.

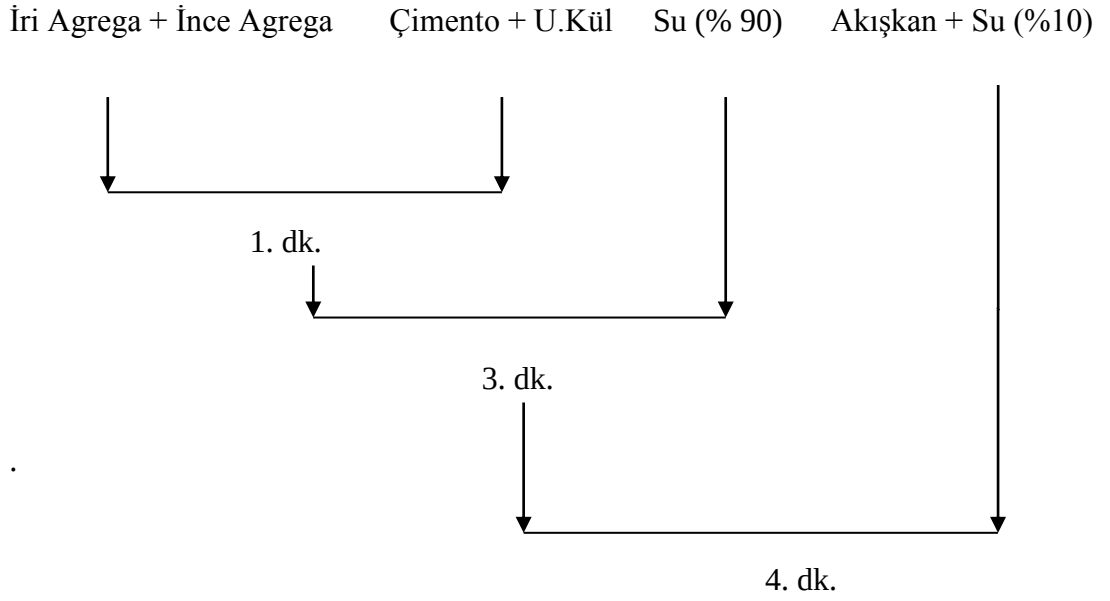
Çizelge 3.12. 1 m<sup>3</sup> beton için malzeme miktarları (kg)

| NO | Karışım ismi | W/B  | Su(kg) | Çimento (kg) | Uçucu kül (kg) | Süper akışkanlaştırıcı (kg) | Agrega 0-4 mm (kg) | Agrega 4-11 mm (kg) | Agrega 11-22 mm (kg) |
|----|--------------|------|--------|--------------|----------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 1  | Şahit        | 0,45 | 180    | 400          | 0              | 4                           | 738,40             | 564,12              | 570,36               |
| 2  | U1           | 0,45 | 180    | 360          | 40             | 4                           | 733,40             | 560,32              | 566,52               |
| 3  | U2           | 0,45 | 180    | 320          | 80             | 4                           | 728,40             | 556,56              | 562,68               |
| 4  | U3           | 0,45 | 180    | 280          | 120            | 2.8                         | 723,48             | 552,80              | 558,88               |
| 5  | U4           | 0,45 | 180    | 240          | 160            | 2.4                         | 718,60             | 549,00              | 555,08               |

### 3.10. Betonun Üretimi ve Kürü

Sertleşmiş beton deneyleri için deney numunesi ve kalıpların şekli ve boyutu TS EN 12390-1 (2002)' de belirtilen özelliklerde kullanılmıştır. Beton karışım hesapları sonucunda ağırlıkları bulunan malzemeler hassas terazide tartıldıktan sonra önceden nemlendirilmiş betoniyer içerisine konulmuştur. Betoniyere malzemelerin konuş sırası

ve karıştırma süreleri aşağıdaki Şekil 4.2.' de gösterilmiştir. Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından, daha önce temizlenmiş ve yağlanmış olan beton numune kalıplarına taze beton karışımları iki aşamalı olarak tablalı vibratör üzerinde yerleştirilmiştir. Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve kürlenmesi TS EN 12390-2 (2002) standardına göre yapılmıştır.



Şekil 3.16. Taze beton karıştırma prosedürü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu kısımda çalışmanın aşamaları, beton karışım oranları, beton üretimi ve kürü ile yürütülen deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

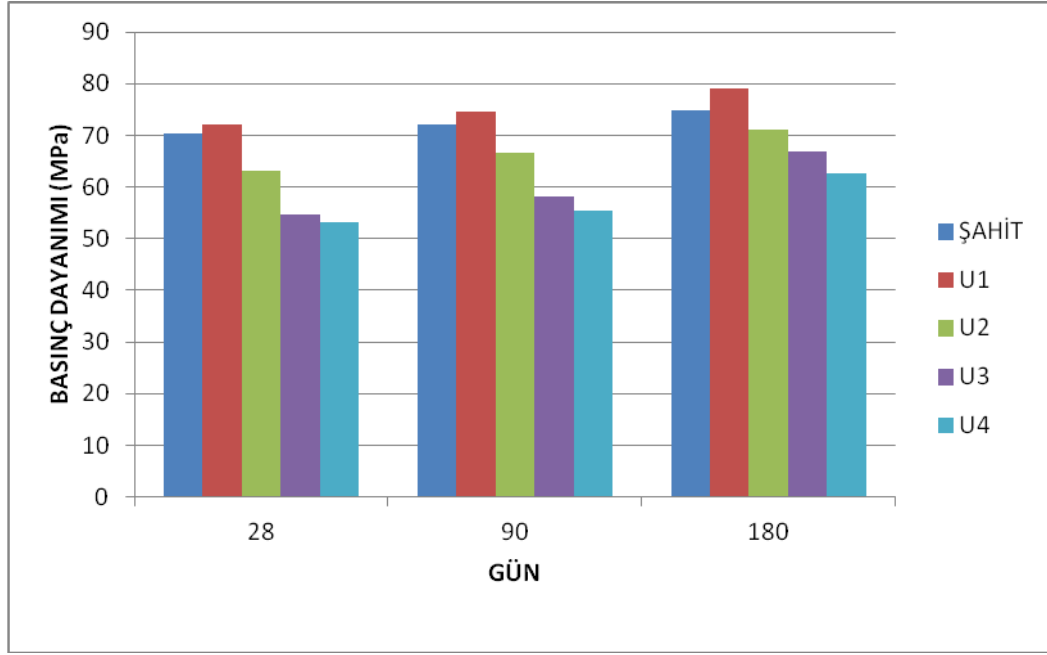
##### 4.1. Sertleşmiş Beton Numuneler Üzerinde Yapılan Deneyler ve Sonuçları

###### 4.1.1. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Her bir karışımın basınç dayanımının tayini için 100×100×100 mm' lik küp numuneler üretilmiştir. Numunelerin 28, 90 ve 180 günlük basınç dayanımları ölçülmüştür. Numuneler, TS EN 12390-4'e (2002) basınç dayanımı-deney makinelerinin standardına uygun deneyi aletinde, basınç dayanımının tayini için deneye tabi tutulmuşlardır. Makine otomatik yükleme sistemi ile küp numuneler 300 kg/sn yükleme hızı ile yüklenmiştir. Uçucu kül katkılı betonlara ait basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak artışı ve optimum muhtevadan sonra azaldığı Çizelge 4.1.' de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. Beton basınç dayanımı deney sonuçları

| NUMUNELER | Basınç Dayanımları (Mpa) |         |          |
|-----------|--------------------------|---------|----------|
|           | 28. Gün                  | 90. Gün | 180. Gün |
| ŞAHİT     | 70,42                    | 72.06   | 74.77    |
| U1        | 72,17                    | 74.65   | 79.13    |
| U2        | 63,03                    | 66.72   | 71.13    |
| U3        | 54,74                    | 58.16   | 66.95    |
| U4        | 53,18                    | 55.43   | 62.61    |



Şekil 4.1. 28-90-180 günlük basınç deneyi sonuçları

İnce taneli puzolanik katkıları çimentodaki kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek dayanım kazanmaktadırlar. Bu malzemelerde  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve su arasındaki reaksiyon, ilave C-S-H jellerinin oluşmasına ve bunun sonucunda dayanımının artmasına neden olmaktadır (Erdoğan, 2004). Uçucu küller de beton içerisinde aynı şekilde davranmaktadır. Bu nedenle, uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımları sadece Portland Çimentosu kullanılan betonlara göre biraz daha düşük olmakta, ancak nihai dayanımları daha yüksek olmaktadır.

Çizelge.4.6 incelendiğinde % 10 sugözü uçucu külü içeren betonların her üç yaşta da şahit betondan daha yüksek basınç dayanımına ulaştığı görülmektedir, %20 uçucu kül içeren betonlar ise 180 gün sonunda şahit betona yakın basınç dayanımı değeri verdiği vermiştir. %30 ve % 40 uçucu kül katkısı basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Bununla birlikte bu betonlarda 180 gün sonunda tatmin edici basınç dayanımları geliştirmişlerdir.

Başıyigit (1993), çalışmasında yüksek oranda uçucu kül katılmasının beton özelliklerine etkilerini araştırmış basınç dayanımları açısından optimum uçucu kül oranının %10-%30 arasında değiştiğini ve uçucu külün çimentoya katıldığı katkı

nispetinde orantılı olarak hidratasyon ısısını düşürdüğünü belirtmiştir. Özcan (1997), çalışmasında uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında çimento ile yer değiştirerek yaptığı deneyler sonucunda, uçucu küllerin betonda işlenebilirliği iyileştirdiğini ve betonda su ihtiyacını azalttığını gözlemiştir. Basınç deneylerine tabi tutulan numunelerden alınan sonuçlarda uçucu kül miktarı %10-20 arasında olan karışımlarda şahit numuneye göre erken yaşlarda düşük fakat ileriki yaşlarda daha yüksek dayanım elde edilmiştir.

Yine yapılmış olan bir çok deneyde betonda %10-20 civarında uçucu kül kullanılması betonun basınç dayanımında artışlar sağladığı görülmüştür.

#### 4.1.2. Elastisite Modülü Değerleri

Kontrol betonu elastisite modülü tayini 28 günlük 100×100×100 mm’lik beton numunelerde yapılmıştır. 100×100×100 mm’ lik numuneler basınç dayanımı deney sonuçları kullanılarak hesaplanmışlardır. Basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisinden yararlanılarak TSE tarafından kullanılan  $E = 14000 + 3250 \sigma^{1/2}$  formülünden hesaplanmıştır. Basınçta elastisite modülü, yüklenmiş kübün maksimum basınç kuvvetleri kullanılarak elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Elastisite modülü değerleri

|                         | Şahit | U1    | U2    | U3    | U4    |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Elastisite Modülü (MPa) | 41272 | 41609 | 39802 | 38045 | 37700 |

TS 500 Standardında karşılaştıracak olursak makul sonuçlar elde ettiğimizi görmekteyiz.

Çizelge 4.3. TS 500' e göre elastisite modülü değeri standardı

| Beton Dayanımı, MPa | Elastisite modülü, TS500, MPa |
|---------------------|-------------------------------|
| 20                  | 28534                         |
| 25                  | 30250                         |
| 30                  | 31800                         |
| 35                  | 33227                         |
| 40                  | 34555                         |

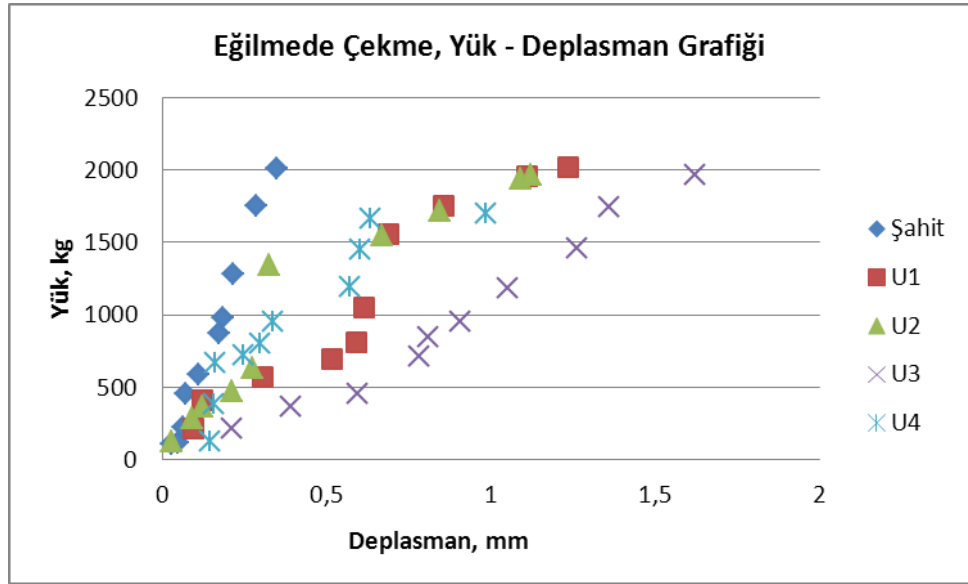
#### 4.1.3. Eğilme (Eğilmede Çekme) Dayanımı Deneyi Sonuçları

Betonun eğilme dayanımı tayini deneyi TS EN 12390-5 (2002) standartlarına uygun, donatısız beton kirişlerde basit kiriş metodu ile yapılmıştır. Eğilme dayanımları tayini için 100×100×400 mm' lik donatısız kiriş numuneler üretilmiştir. 400 mm uzunluğundaki kiriş numune 380 mm açıklığındaki mesnetler üzerine yerleştirilmiş ve orta noktalarından tekil yük uygulanmıştır. Bu deney metodunda kiriş numuneler açıklığın 1/2 noktasında yüklenmiştir. Deney 2 ton eğilme kapasiteli preste, yükleme hızı 20 kg/sn olacak şekilde yüklenmiştir. Numunelerin 28 günlük eğilme dayanımları ölçülmüştür. Deneye ait eğilme dayanımları Çizelge 4.4. 'de verilmiştir.



Çizelge 4.4. Eğilme dayanımı uygulanan numunelerde kuvvet ve deplasman değerleri

|    | Şahit    |           | U1       |           | U2       |           | U3       |           | U4       |           |
|----|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|
|    | Yük (kg) | Dep. (mm) | Yük (kg) | Dep. (mm) | Yük (kg) | Dep. (mm) | Yük (kg) | Dep. (mm) | Yük (kg) | Dep. (mm) |
| 1  | 105.9    | 0.030     | 218.3    | 0.096     | 121.3    | 0.030     | 212.7    | 0.211     | 127.43   | 0.144     |
| 2  | 115.4    | 0.046     | 414.1    | 0.122     | 285.3    | 0.091     | 369.8    | 0.391     | 380.65   | 0.156     |
| 3  | 227.5    | 0.065     | 570.7    | 0.305     | 367.8    | 0.122     | 451.6    | 0.596     | 667.65   | 0.161     |
| 4  | 453.3    | 0.072     | 694.3    | 0.518     | 473.2    | 0.213     | 715.3    | 0.782     | 718.43   | 0.248     |
| 5  | 591.2    | 0.109     | 810.1    | 0.590     | 633.8    | 0.275     | 841.7    | 0.807     | 803.12   | 0.298     |
| 6  | 873.4    | 0.172     | 1054     | 0.612     | 1341     | 0.324     | 952.3    | 0.906     | 949.21   | 0.335     |
| 7  | 979.1    | 0.185     | 1555     | 0.688     | 1547.    | 0.668     | 1183.    | 1.05      | 1190.9   | 0.571     |
| 8  | 1285     | 0.216     | 1754     | 0.857     | 1719.    | 0.845     | 1459.    | 1.26      | 1447.8   | 0.602     |
| 9  | 1749     | 0.284     | 1960     | 1.110     | 1941     | 1.09      | 1743     | 1.36      | 1665.2   | 0.633     |
| 10 | 2013     | 0.348     | 2015     | 1.235     | 1970.    | 1.12      | 1967     | 1.62      | 1697.6   | 0.985     |



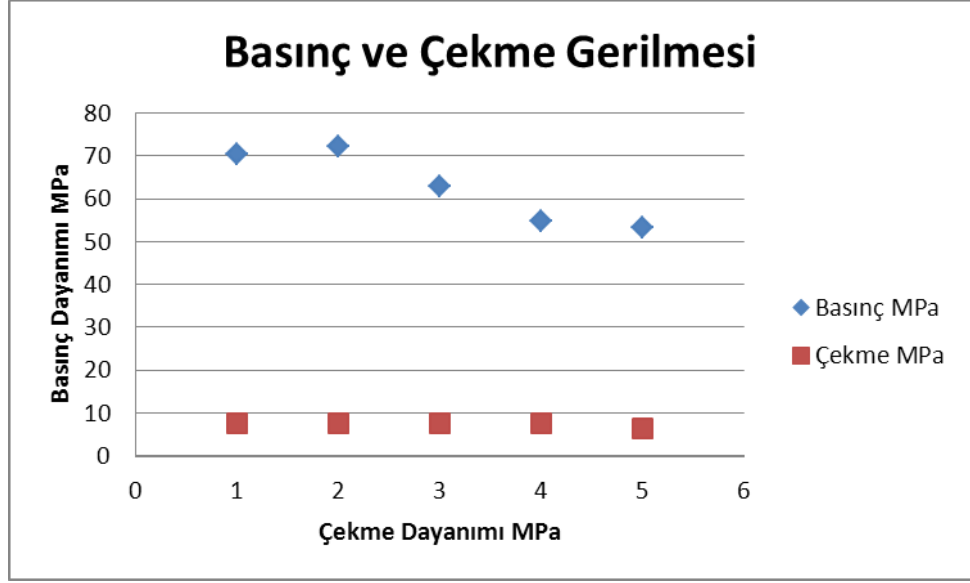
Şekil 4.2. Şahit, Uçucu kül %10, 20, 30, 40 oranlarında eğilmede çekme maksimum yük-birim deformasyon grafiği

Çizelge 4.5. Eğilme dayanımı deneyi sonuçları

| Karışımlar | Eğilme Dayanımı (Mpa) |
|------------|-----------------------|
| Şahit      | 7,64                  |
| U1         | 7,66                  |
| U2         | 7,48                  |
| U3         | 7,47                  |
| U4         | 6,44                  |

Çizelge 4.5.' de verilen eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde tüm uçucu kül katkılı karışımların Şahit numuneye çok yakın eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Uçucu kül katkısının 28 günlük eğilme dayanımında kayba neden olmazken, nihai eğilme dayanımlarının şahit numuneden daha yüksek olacağı söylenebilir.

Eğilme dayanımları sonuçlarına göre 28 gün sonundaki uçucu kül katkısının %10 oranına kadar kullanımında kontrol grubunun kontrol betonu eğilme dayanımının üzerine ulaştıkları görülmüştür. %30 ve %40 oranında uçucu kül katkısının betonların eğilme dayanımını 28 gün sonunda kontrol betonun eğilme dayanımının yaklaşık olarak %84 ve üzerinde bir değere ulaştıkları görülmüştür. Zaman içerisinde uçucu kül katkılı betonların eğilme dayanımlarındaki artışın, basınç dayanımlarındaki artıştan daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 4.3. Basınç ve çekme dayanımı değerleri karşılaştırılması

#### 4.1.4. Su Emme Oranı Tayini Deneyi Sonuçları

Sertleşmiş betonda su emme oranlarının tayini için 28 gün kür edilmiş 100×100×100 mm' lik küp numuneler kullanılmıştır. Küp numunelerin sırasıyla etüv kurusu ağırlıkları ve suya doymun ağırlıkları tespit edilmiştir. Su emme oranları TS 3624, 1981 standardına göre belirlenmiştir. Çizelge.4.6 incelendiğinde %10 ve % 20 uçucu kül katkısının su emme değerini şahit numuneye göre bir miktar azalttığı görülmektedir. Bunun sebebi, uçucu külün  $\text{Ca(OH)}_2$  ile yapmış olduğu puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ilave bağlayıcı hamurun boşlukları azaltmasıdır.

Lea tarafından belirlenen sonuçlara göre, beton etüvde kurutulduktan sonra su içerisinde bırakılan numunelerin su emme miktarları %3,2 ile % 12,3 arasında değişmektedir. Betonun emebileceği su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların hacmi ile ilgilidir. Betondaki toplam boşluk hacmi ise, betonda kullanılan su/çimento oranı, agrega cinsi, kür koşulları, kür süresi, beton elemanın boyutu gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir (Lea ve Arnold, 1970).

Su emme kapasitesi yüksek olan betonların dayanımları daha düşük olmaktadır. Bu maddeden ve yaptığımız çalışma sonucu aldığımız değerleri yorumlayacak olursak beton dayanımı yüksek olan numunelerde su emme kapasitesi daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 4.6. Su emme deneyi sonuçları

| Numuneler | Su Emme Değerleri % |
|-----------|---------------------|
| ŞAHİT     | 3,35                |
| U1        | 3,20                |
| U2        | 3,30                |
| U3        | 3,59                |
| U4        | 3,44                |

#### 4.1.5. Kapiler Su Emme Katsayısı Tayini Deneyi

Beton numunelerin kapiler su emme katsayıları 28 gün kür edilen 100x100x100 mm' lik küp numuneler üzerinde belirlenmiştir. Beton numunenin sadece alt yüzeyi suya temas edeceğinden numunelerin sadece yan yüzeyleri ısıtılmış parafin ile izole edilmiştir. Başlangıç ağırlığı olarak numunenin parafinli ağırlığı kaydedilmiştir. Numuneler su yüksekliği yaklaşık olarak 10 mm olan deney havuzuna yerleştirilmiştir. Deney numuneleri 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121 ve 144 dakikalarda ağırlıkları kaydedilerek su emme miktarları (Q) hesaplanmıştır. Emilen su miktarının temas eden yüzey alanına bölümünün oranı ile (Q/A) geçen zamanın (t) dakika cinsinden değerinin karekökü arasında lineer bir ilişki kurulmuştur. Bu ilişkiye ait elde edilen eğimler bize beton numunelerin kapiler su emme katsayılarını vermiştir. Çizelge.4.7 kapilarite katsayısı deney sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde % 10 uçucu kül içeren numunenin kapilarite katsayısının şahit numuneye göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber % 20 uçucu kül katkısı da kapilar su emmenin bir miktar azalmasına neden olmuştur. Kapiler boşlukların miktarını etkileyen en önemli faktörlerden bir tanesi çimentonun hidratasyonudur. Hidratasyon ilerledikçe oluşan bağlayıcı hamur kapiler boşlukları doldurarak bağlantılarını kesmektedir. Benzer şekilde uçucu külü çimentonun ana bileşenlerinin hidratasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile yapmış olduğu reaksiyon sonucu ilave C-S-H jelleri oluşmakta ve bu da kapiler boşluk miktarını azaltmaktadır.

Çizelge 4.7. Kapilarite katsayısı deneyi sonuçları

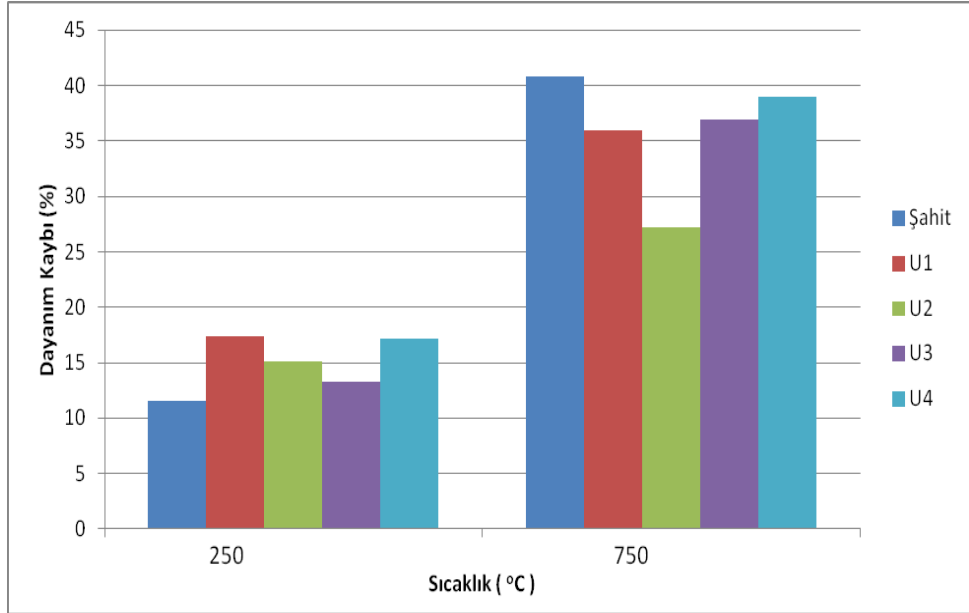
| Numuneler | Kapilarite Katsayısı (cm/dk <sup>1/2</sup> ) |
|-----------|----------------------------------------------|
| Şahit     | 0,0033                                       |
| U1        | 0,0019                                       |
| U2        | 0,0028                                       |
| U3        | 0,0041                                       |
| U4        | 0,0039                                       |

#### 4.1.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi Sonuçları

Beton yangın dayanımı suda 28 gün kür edilen 100×100×100 mm' lik kuru küp numuneler kullanılmıştır. Küp numuneler yüksek sıcaklıklı fırına koyulmadan önce etüvde 105°C' de 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kuru küp numunelerin kullanılmasının sebebi beton içerisindeki su parçacıkları yüksek sıcaklık etkisi altında betonun patlamasına neden olmaktadır. Etüvden alınan numuneler sıcaklık artışı 6°C/dk olan deney aletinde sırasıyla 250 ve 750°C sıcaklıklara 2 saat maruz bırakılmıştır. Fırından alınan numunelerin basınç dayanımları ölçülmüş, sıcaklık etkisi altında beton numunelerin davranışları tespit edilmiştir. Çizelge 4.8.' de yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi görülmektedir.

Çizelge 4.8. Yüksek Sıcaklık etkisi deneyi sonuçları

| Numuneler | Yüksek sıcaklık Etkisi Sonunda |       |       |
|-----------|--------------------------------|-------|-------|
|           | Basınç Dayanımları MPa         |       |       |
|           | 28 Günlük Beton                | 250°C | 750°C |
|           | Basınç Dayanımı                |       |       |
| Şahit     | 70,42                          | 62,23 | 41,71 |
| U1        | 72,17                          | 59,58 | 46,20 |
| U2        | 63,03                          | 53,50 | 45,85 |
| U3        | 58,74                          | 50,93 | 37,06 |
| U4        | 58,13                          | 48,11 | 35,45 |



Şekil 4.4. Yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanım kayıpları (%)

Çizelge 4.9. Sıcaklık artışının beton üzerinde oluşturduğu etkiler

| Sıcaklık  | Beton üzerindeki etkisi                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 100-150°C | Kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, jel boşluklarındaki suyun buharlaşması      |
| 150-250°C | Büzülme, kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş, pembemsi renk          |
| 250-300°C | Alüminli ve demir oksitli bileşenlerde bünye suyunun kaybı, basınç dayanımında düşüş |
| -400°C    | Ca(OH) <sub>2</sub> ‘den CaO ‘ e dönüşüm (% 33 hacim azalması)                       |
| 400-600°C | CSH yapısının tahribi, gri beyaz renk, dayanımda %80’ lere varan azalma              |

Çizelge 4.8.’ de verilen deney sonuçları ile Şekil 4.3.’ de verilen dayanım kaybı yüzdeleri sonuçları incelendiğinde 250°C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde en az dayanım kaybı şahit numunede olmuştur. Bunun aksine 750°C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde ise başta %20 uçucu kül içeren U2 karışımı olmak üzere tüm uçucu küllü betonlarda şahit numuneden daha az dayanım kaybı görülmektedir. Çizelge 4.9.’ de belirtildiği gibi 250°C civarındaki sıcaklıklarda büzülme, kılcal çatlak oluşumu ve bünye suyu kaybından dolayı basınç dayanımında düşüşler görülmektedir. Bu durumdan uçucu küllü numuneler daha fazla etkilenmişlerdir. Sıcaklığın 400°C ‘yi geçmesi ile Ca(OH)<sub>2</sub> CaO’ ya dönüşmekte, 600°C‘ nin üzerinde ise C-S-H yapısı tahrip olmaktadır. Uçucu kül Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek daha fazla C-S-H jeli oluşturmaktadır. Bu da 750°C’ ye maruz uçucu küllü numunelerin şahit numuneye göre daha az hasar görmesine neden olmaktadır.

#### 4.1.7. Aşınma Dayanımı Deneyi Sonuçları

Uçucu kül katkılı beton grupları için 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmış, 28 gün kür edilmiştir. Numuneler TS 2824 EN 1341 standardı temel alınarak, düşey aşındırma cihazında aşındırıcı diskin numune yüzeyine 75 tur sürtünmesi sonucu gerçekleştirilmiştir. Aşınma kaybı, ortalama oyuk genişliği olarak beton hacmindeki azalma olarak ölçülmüştür. Numune yüzeyinde oluşan oyuk genişliği

3 farklı noktadan ölçülerek ortalaması alınmıştır. Aşınma deneyi sonuçları Çizelge 4.10.' da görülmektedir.

Çizelge 4.10. Aşınma Deneyi Oyuk Derinliği Sonuçları

| Numuneler | Aşınma Derinlikleri (cm) |     |     |          |
|-----------|--------------------------|-----|-----|----------|
|           | C1                       | C2  | C3  | Ortalama |
| Şahit     | 2.3                      | 2.5 | 2.5 | 2.43     |
| U1        | 2.1                      | 2.4 | 2.6 | 2.37     |
| U2        | 2.0                      | 2.2 | 2.4 | 2.20     |
| U3        | 2.3                      | 2.5 | 2.6 | 2.47     |
| U4        | 2.3                      | 2.6 | 2.7 | 2.53     |

Çizelge 4.10.' da verilen aşınma deney sonuçları incelendiğinde, ortalama oyuk derinliği değerleri birbirine yakın olmakla birlikte %10 ve %20 uçucu kül katkısının betonun aşınma dayanımını bir miktar iyileştirdiği görülmektedir.

Ağırlık kaybı, hacim kaybı olarak da ifade edilebilmektedir. Uçucu kül katkılı betonlarda, sürtünme ile yapılan aşınma deneylerinde uçucu kül ikame oranı % 20' ye kadar azaldığı uçucu kül miktarı arttıkça aşınma kayıplarının da arttığı Çizelge 4.11' te gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Aşınma derinliği ağırlık kayıpları sonuçları

| Uçucu Kül Karışımları | Ağırlıkça aşınma kaybı (%) |          |                |                   |
|-----------------------|----------------------------|----------|----------------|-------------------|
|                       | Wilk(gr)                   | Wson(gr) | Wilk-Wson (gr) | Ağırlık kaybı (%) |
| Şahit                 | 2489                       | 2469.5   | 2.5            | 0.1               |
| U1                    | 2485                       | 2483     | 2              | 0.08              |
| U2                    | 2480                       | 2478.7   | 1.3            | 0.052             |
| U3                    | 2470.8                     | 2468     | 2.8            | 0.113             |
| U4                    | 2450.5                     | 2447.1   | 3.4            | 0.14              |

Aşınma kayıpları ile dayanımlar arasında oldukça kuvvetli ilişkiler olduğu görülmüştür. Aşınma kayıplarının eğilme dayanımı ile olan ilişkilerinin değerleri biraz



daha fazla olmuştur. Dayanımları yüksek olan betonların aşınma kayıplarının daha az olduğu belirlenmiştir. Literatürde Portland çimentosu betonunun ve uçucu küllü betonların aşınma dayanımlarının basınç dayanımlarına bağlı olduğu belirtilmektedir (Gebler ve Klieger, 1986; Atış, 2000; Siddique, 2004b).

Uçucu kül katkılı betonlarda, sürtünme yolu ile yapılan aşınma deneylerinde uçucu kül ikame oranı arttıkça aşınma kayıplarının belli bir orandan sonra arttığı görülmüştür. Sürtünme yolu ile yapılan aşınma deneyleri sonucunda bulunan uçucu küllü betonların aşınma kaybı değerlerinin yüzde olarak birbirine oldukça yakın oldukları görülmüştür.

#### 4.1.8. Ultrasonik Ses Deneyi Sonuçları

Yapılan deneyde 100×100×100 mm' lik kür havuzunda bulunan küp numuneler etüvde 105°C sıcaklıkta 24 saat bekletilmiş ve ölçüm cihazının numune yüzeyine denk gelen kısmına jel sürülerek yerleştirilmiştir. Her numune için frekans değerleri okunarak beton kalitesi kontrol edilmiştir. Beton bloğunun bir yüzeyinden gönderilen sesüstü dalganın, bloktaki diğer bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$V = (S / t) 10^6$$

Burada,

V = Sesüstü dalga hızı, metre/saniye

S = Beton bloğun sesüstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe, metre

T = Sesüstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman, mikrosaniye.

Çizelge 4.12. Ultrasonik ses deneyi sonuçları

| Numuneler | Dalga Hızı (m/s) |
|-----------|------------------|
| Şahit     | 4830             |
| U1        | 4980             |
| U2        | 4810             |
| U3        | 4720             |
| U4        | 4610             |

Çizelge 4.12.’ de verilen ultrasonik ses hızı deney sonuçları, Çizelge 4.13’ e göre değerlendirildiğinde tüm numunelerin beton kalitesi düzeyi ‘mükemmel’ tespit edilmiştir. Çizelge 4.12. ve Çizelge 4.1. özellikleri incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak en yüksek ses hızına %10 uçucu kül içeren numuneler ulaşmıştır.

Çizelge 4.13. Ultrasonik ses deneyi referans aralıkları

| Dalga Hızı, m/s | Beton Kalitesi |
|-----------------|----------------|
| >4500           | Mükemmel       |
| 3500-4500       | İyi            |
| 3000-3500       | Şüpheli        |
| 2000-3000       | Zayıf          |
| 2000<           | Çok Zayıf      |

#### 4.1.9. Basıncılı Su Geçirgenlik Deneyi Sonuçları

28 gün kür edilen 150×150×150 mm boyutundaki beton numuneler 24 saat etüvde kurutulduktan sonra 72 saat 5 bar sabit basınçta su etkisi altında bırakılmış ve betona işleme derinlikleri aşağıdaki Çizelge 4.14.’ de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Basınçlı su işleme derinlikleri deneyi sonuçları

| Karışımlar | Su İşleme Derinliği (mm) |
|------------|--------------------------|
| Şahit      | 16.80                    |
| U1         | 13.90                    |
| U2         | 14.60                    |
| U3         | 17.04                    |
| U4         | 19.57                    |

Basınçlı su geçirgenliği deneyinde elde edilen su işleme derinlikleri incelendiğinde % 10 ve % 20 uçucu kül içeren numunelerin su işleme derinliğinin şahit numuneye oranla daha az olduğu görülmektedir. % 20' ye kadar olan uçucu kül katkısının çimento hamuru hacmini arttırarak betonun geçirimsizliğini arttırdığı görülmektedir. % 20'den daha fazla uçucu kül katkısı ise su işleme derinliğini arttırmıştır. Bu sonuçların su emme ve kapilarite deneylerinden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.15. Su emme ve kapilarite katsayısı değerleri

| Numuneler | Su Emme Değerleri% | Kapilarite Katsayısı<br>(cm/dk <sup>1/2</sup> ) |
|-----------|--------------------|-------------------------------------------------|
| ŞAHİT     | 3,35               | 0,0033                                          |
| U1        | 3,20               | 0,0019                                          |
| U2        | 3,30               | 0,0028                                          |
| U3        | 3,59               | 0,0041                                          |
| U4        | 3,44               | 0,0039                                          |

Betona katılan uçucu kül oranı arttıkça su emme oranlarının arttığı görülmüştür. Yalnızca %10 uçucu kül ilavesi ile boşluk ve su emme oranları kontrol betonuna eşdeğer düzeyde olmuştur. Yine Uçucu kül miktarının belirli bir orandan sonra artması ile kapiler su emme katsayılarının da arttığı görülmüştür. Yapılan su emme, kılcal su emme (kapilarite) ve basınçlı su geçirimsizliği deneyleri sonucunda her üç durumda da su geçirimsizliği, aynı oranlardaki uçucu oranında uçucu kül kullanıldığı zaman optimum sonuçlara ulaşıldığı gözlenmiştir. Uçucu kül miktarı %10-20 arasında kullanılması su geçirimsizlik bakımında üç deney de birbirini destekleyecek nitelikte sonuçlar vermiştir.

#### **4.1.10. Yarma (Yarmada Çekme) Dayanımı Deneyi Sonuçları**

Yarmada çekme dayanımı deneyleri 28 günlük 150×150×150 mm' lik küp beton numuneler üzerinde yapılmıştır. Uçucu kül katkılı beton gruplarına ait 28 günlük yarmada çekme dayanımları Çizelge 4.16.' da verilmiştir. Uçucu kül katkılı betonlarda küp numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarına göre, uçucu kül katkısının betonların yarmada çekme dayanımlarını kontrol numunelere göre kıyaslandığında yaklaşık olarak birbirlerine oldukça yakın çıkan değerlerde ve 4 MPa değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. %30 ve %40 oranında uçucu kül katkılı betonlarda küp yarma dayanımları değerlerinde düşüş gözlenmiştir.

Küp yarma dayanımlarının ise küp basınç dayanımlarının yaklaşık %7'si kadar olduğu görülmüştür. Lee (2002) uçucu küllü betonların yarmada çekme dayanımlarını basınç dayanımlarının Portland çimentolu betonların da oranın %7-10 arasında olduğunu, uçucu küllü betonların çekme dayanımlarına önemli bir değişiklik yapmadığını belirtmiştir.

Çizelge 4.16. Yarmada çekme dayanımları deney sonuçları

| Beton Karışımları | Yarma Dayanımı (MPa) |
|-------------------|----------------------|
| Şahit             | 4,52                 |
| U1                | 5,04                 |
| U2                | 4,99                 |
| U3                | 4,12                 |
| U4                | 4,03                 |

#### 4.5.11. Gaz Geçirimsizlik Deney Sonuçları

Gaz geçirgenlik deneyi oksijen gazının etüv kurusu silindir numune içinden belirli mesafeden geçiş süreleri bulunarak hesaplamalarda bulunulmuştur. 28 günlük numune deney aletine yerleşecek şekilde kesilmiş etüvde 24 saat 105°C’ de kurumaya bırakılmıştır.

Çizelge 4.17.’ da hesaplamalar sonucu elde edilen gaz geçirgenliği katsayıları verilmektedir. Çizelge 4.17. incelendiğinde % 30 ve %40 uçucu kül katkısının, numunelerin gaz geçirgenlik katsayısında azalmaya neden olduğu, diğer bir deyişle gaz geçirimsizliğini azalttığı görülmektedir. Özellikle % 10 ve % 20 uçucu kül içeren betonlar, şahit betondan çok daha az gaz geçirgenlik katsayısı değerine sahiptirler. Uçucu kül ikamesiyle artan bağlayıcı hamur hacmi gaz geçirgenliğinde azalmaya sebep olmuştur.

Bu sonuçların su işleme derinliği ve kapilarite katsayısı sonuçlarıyla da uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.17. Gaz geçirgenlik katsayısı sonuçları

| Beton Karışımları | Gaz Geçirgenlik Katsayısı, K ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) |
|-------------------|---------------------------------------------------------|
| Şahit             | 0.397                                                   |
| U1                | 0.355                                                   |
| U2                | 0.366                                                   |
| U3                | 0.380                                                   |
| U4                | 0.422                                                   |

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Beton basınç dayanım sonuçları , % 10 Sugözü uçucu külü katkısının her üç yaşta da (28, 90 ve 180 gün) basınç dayanımında artış meydana geldiği, %20 uçucu kül katkılı betonların ise 180 gün sonunda şahit betona yakın basınç dayanımı değerine ulaştığı görülmektedir. %20' nin üzerindeki uçucu kül katkısı basınç dayanımında bir miktar düşüşe sebep olmuştur. Fakat bütün numunelerde 180 gün sonunda elde edilen sonuçlar ve dayanımlardaki artış optimum miktarda uçucu kül kullanılmasının haricinde de olumlu değerler verdiği gözlenmiştir.

Eğilme dayanımı sonuçları tüm uçucu kül katkılı karışımların şahit numuneye çok yakın eğilme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir. Uçucu kül katkısının 28 günlük eğilme dayanımında şahit numuneye kıyasla bir azalmaya neden olmadığı görülmektedir. Daha uzun süreli eğilme dayanımlarının incelendiği bir çalışma yürütülmesi Sugözü uçucu külünün eğilme dayanımına etkisini daha iyi görebilmek açısından faydalı olacaktır.

Sugözü uçucu külünün çimento yerine % 10 ve %20 oranlarında kullanılması ile yarma dayanımında yaklaşık % 10 bir artış meydana gelmiştir. %30 ve %40 uçucu kül katkısı ise yarma dayanımında yaklaşık %10'luk bir kayba sebep olmuştur.

%10 ve % 20 uçucu kül katkısı su emme değerlerinde şahit numuneye göre bir miktar azalmaya sebep olmaktadır. Uçucu külün çimento hamurunun boşluk yapısını iyileştirerek su emme miktarını azalttığı söylenebilir.

Kapilarite deneyi sonuçları incelendiğinde % 10 uçucu kül içeren numunenin kapilarite katsayısının şahit numuneye göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bununla beraber % 20 uçucu kül katkısı da kapiler su emmenin bir miktar azalmasına neden olmuştur. Uçucu külün kapiler boşluk miktarını azalttığı görülmektedir.

Yüksek sıcaklığın dayanım kaybı üzerine etkisi incelendiğinde 250 °C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde en az dayanım kaybı şahit numunede olmuştur. Bunun aksine 750 °C sıcaklığa 2 saat maruz kalan numunelerde ise başta %20 uçucu kül içeren

U2 karışımı olmak üzere tüm uçucu küllü betonlarda şahit numuneden daha az dayanım kaybı görülmektedir. Uçucu külün yüksek sıcaklığa karşı betonun direncini arttırdığı söylenebilir.

Aşınma deney sonuçları incelendiğinde, ortalama oyuk derinliği değerleri birbirine yakın olmakla birlikte %10 ve %20 uçucu kül katkısının betonun aşınma dayanımını bir miktar iyileştirdiği görülmektedir.

Ultrasonik ses hızı deney sonuçları değerlendirildiğinde tüm numunelerin beton kalitesi düzeyi ‘‘mükemmel’’ tespit edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer olarak en yüksek ses hızına %10 uçucu kül içeren numuneler ulaşmıştır.

Basıncılı su geçirgenlik deneyi sonucunda su işleme derinliğinin uçucu kül karışım oranı % 10-20 olduğu numunelerde daha düşük olduğu, geçirgenliğin daha az olduğu tespit edilmiştir.

Numunelere ait gaz geçirgenlik katsayısı sonuçları, % 30’ a kadar uçucu kül katkısının gaz geçirgenliğini azalttığını göstermektedir. Özellikle %10-%20’ lik uçucu kül katkısının gaz geçirgenliğin de önemli bir azalmaya neden olduğunu görülmektedir. Bu sonuçların diğer deney sonuçları (basıncılı su geçirgenliği, kapilarite, su emme) ile uyumlu olması, yaklaşık % 20 uçucu kül katkısının beton geçirgenliğini azaltma konusunda etkili olabileceğini göstermektedir.

Yukarıda verilen sonuçlar ışığında Sugözü uçucu külünün betonda mineral katkı olarak çimento yerine ağırlıkça %10-20 kullanılması durumunda dayanım değerlerini iyileştirdiği, boşluk oranı ve geçirimsizlik değerlerini azalttığı görülmektedir.

## 5.2. Öneriler

- ❖ Deney sonuçları Sugözü Termik Santrali uçucu külünün %10-%20 oranlarında betonda mineral katkı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda bu uçucu kül, parke taşı üretiminde, yol ve park alanı betonlarında, bordür taşı üretiminde çimento katkısı olarak %10-20 ikame oranında ön kullanım denemeleri yapılarak kullanılabilirler.



- ❖ Bu çalışmada yürütülemeyen diğer bazı durabilite özelliklerini de kapsayan deneylerin (örneğin : ıslanma kuruma, donma çözünme, sülfat ve asit atağı, alkali silis reaksiyonu deneyleri, hidratasyon ısısı ölçümü) de kapsadığı bir çalışma yürütülebilir.
- ❖ İnce öğütülmüş cüruf veya silis dumanı ile mevcut uçucu kül arasında üçlü veya daha çoklu karışımların harç veya beton özelliklerini hangi mertebede iyileştirebileceği araştırılabilir.

## KAYNAKLAR

- ACI Committee 226.3R-87, 1990. Use of fly ash in concrete. **ACI, Detroit, Michigan, Forth printing**, 29p.
- ASTM C 311-94a, 1994. Standard test methods for sampling and testing fly as hor natural puzzolan for use as a mineral admixtures in portland cement concrete. **Annual Book of ASTM Standards**.
- ASTM C 78, 2002. Flextural strength of concrete ( Using simple beam with third-point loading). **Annual Book of ASTM Standards**.
- ASTM C 293, 1997. Standard test method for flextural strength of concrete ( Using simple beam with center-point loading). **Annual Book of ASTM Standards**.
- ASTM C 311, 1994. Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixtural Portland-Cement Concrete. **Annual Book of ASTM Standards**.
- ASTM C 618, 1998. Standart Specification for Coal Ash and Rawor Calcined Natural Pozzolanfor Use as a Mineral Admixture in Concrete. **Annual Book of ASTM Standarts, No.4**.
- Atiş, C.D., Tartıcı, H., Sevim, U.K., Özcan, F., Akçaözoğlu, K., Yüzgeç, C., 2002. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton Katkısı Olarak Kullanılabilirliği. Beşinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, **İstanbul Teknik Üniversitesi**, İstanbul, s.161-168.
- Atiş, C.D., 2003a. High Volume Fly Ash Concrete with High Strength and Low Drying Shrinkage. **Journal of Materials in Engineering**, 15(2):153-156.
- Atiş, C.D., Kılıç, A., Sevim, U.K., 2004b. Strength and Shrinkage Properties of Mortar Containing a Nonstandard High-Calcium Fly Ash. **Cement and Concrete Research**, 34:99-102.
- Atiş, C.D., 2005. Strength Properties of High-Volume Fly Ash Roller Compacted and Workable Concrete, and Influence of Curing Condition. **Cement and Concrete Research**, 35(6):1112-1121.
- Atanur, A. ve Yağız F., 1970. An investigation of the use of cement-fly ash for base course stabilization. p.18, **KGM**, Ankara.
- ASTM C 618-94a, 1994. Standart spesification for coal fly ash and raw or calcined natural puzzolan for use as a mineral admixtures in portland cement concrete. **Annual Book of ASTM Standards**.
- Aruntaş, Y.,2006. Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık fakültesi dergisi**.Cil.21, Sayı .26.Ankara.
- Başığit, C., 1993. Yüksek oranda, yüksek kalsiyumlu uçucu kül katılmasının beton özelliklerine etkisi. **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi
- Baradan, B., Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık( Durabilite) syf.71. **Dokuz Eylül Üniversitesi**. İZMİR.2010.
- Baradan, B., Beton. **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları** No; 334, syf.34 İZMİR.2012.

- Bilim, C., 2001. Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton İçinde Kullanılabilirliği ve Hızlandırılmış Kür Uygulaması. **Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, Antakya, 128s.
- Bentli, İ., 2005. Seyitömer Termik Santrali Uçucu Külünün Tuğla Katkı Hammaddesi Olarak Kullanımı **Türkiye 19. Ulu. Ataruxı Madencilik Kongresi ve Fuarı. /MCET2005**, İzmir, Türkiye, 2005
- Bosbach, D., Enders M., 1998. Microphotography af high calzium fly ash particle surfaces. **Advances in Cement Research**, C.10, No.1, s.17-24.
- BSI.BS 3892, 1993. Specification for Pulverized-Fuel Ash for Use with **Portland Cement Part-1.**, London.
- Cook, J.E., 1983. Fly Ash in concrete-Thecnical considerations. **Concrete International. Detroit**, ACI, pp.52-57.
- Costa, U., Massarazza F., 1977. Influenza del trattamento termico sulla reattiva' con la calce di alcune pozzolane naturali, No.3, pp. 105-122.
- Çelik, Ö., Yurter G., Kan S., Yeprem H. 2004. farklı puzolan katkıların çimento harçlarının mekanik özellikler üzerine etkisi, **Doğuş Üniversitesi Dergisi**, 5 (2), 147-154
- Diamond, S., 1986 . Particle morphologies in fly ash. **Cement and Concrete Research**, 16, No.4, s.559-579.
- Dinçer, R., 2004. Uçucu Kül, Çelik Lif ve Pomza İçeren Betonların Mekanik Özellikleri. **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Adana, 156s.
- Demirel, B., 2010. Uçucu külün karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özelliklerine etkisi. **Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online Dergi**, Cilt 9, Sayı:1
- Erdinç, M., 1995. Uçucu Küllü Betonlarda Dayanım ve Klor Geçirirmliliği. **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 143s.
- Erdoğan, Y.T., 1997. Admixtures for Concrete. **Middle East Technical University Press**, Ankara.
- Erdoğan, Y.T., 1991. Strenght properties of low lime and high lime fly ash concretes. **International Ash Symposium**. Vol.1, pp.1-12.
- Erdoğdu, K., Tokyay M., Türker P., 2003 . Traslar ve Traslı Çimentolar. **TÇMB/AR-GE/Y99-2**, 5.Baskı, Ankara.
- Erdoğan, TY., 2003. Beton. **ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş.**, Ankara.
- Erdoğan, Agregalar, **THBB**, Ankara, 1995, ss.54-62.
- Erdoğan, 1995. Neville ve Brooks 1993 Neville, A.M. 1981. **Properties os Concrete. Longan Scientific**, New York, 843 s, Ankara.
- Erdoğan, T.Y., 2004. Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, Çimentolar, Agregalar, Su. **Türkiye Hazır Beton Birliği**, Ankara, 277s.
- Erdoğan, T.Y., Beton, **ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayını**, s.741, Ankara, 2003.
- Erdoğan, T. Y., Betonlu Oluşturan Malzemeler- Karışım ve Bakım Suları, **THBB Yayınları**, 1995, s. 61.
- Erdoğan, T. Y., Soru ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri, **THBB Yayınları**, 2004, ss. 219-252.
- Gutt, W., Nixon P.J., 1979. Use of waste materials in the construction industry. **Materials and Structures**, No.70, pp.233-306.

- Gökçe, A., Özturan, T., 1996. Uçucu Kül Pozolanik Aktivitesi İle İlgili Bazı Mevcut Standartların Değerlendirilmesi. **4. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası**, İTÜ Maçka Kampüsü, İstanbul, s.223-244.
- Görhan, G., Uçucu Kül Bölüm II: Kimyasal, Mineralojik ve Morfolojik Özellikler. **Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 5, No: 2, 2009.**Afyon.
- Güler , G., Uçucu Küllerin Özellikleri ve Kullanım Alanları. **Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı, IMCET2Q05. izmir. Türkiye, 09-12 Haziran 2005.**
- Güldür, Ş., 2009. Niğde bölgesinden temin edilen mikrokalsitin ve Yumurtalık Sugözü Termik Santralinden elde edilen uçucu külün beton özelliklerine etkileri araştırılmıştır. **Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.** Niğde.
- Günindi, İ., 2005. Yumurtalık Sugözü Uçucu Külü İçeren Betonların Basınç, Eğilme ve Aşınma Dayanımlarının Araştırılması. **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 67s.**
- Güneysi, E., Geseoğlu M., 2004. Uçucu kül ve metakaolın içeren kendiliğinden yerleşen harçlar. **Gaziantep Üni., İnşaat Müh. Bölümü.** Gaziantep.
- Güner, M. S., V. Süme, Yapı Malzemesi ve Beton, Aktif Yayınevi, Ankara, 2001.
- Meiningner R.C., 1982. Use of fly ash in cement and concrete. **Concrete International. Detroit.** ACI, pp. 52-57.
- Hazır Beton, **THBB**, Mart-Nisan 2001, Yıl 8, Sayı 44, ss. 20-21.
- Karahan, O., 2006. Sugözü uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliği, **Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü** Doktora Tezi .Kayseri.
- Koçkal, U., Özturan T., 2007. Sinterleme Sıcaklığının Uçucu Kül Hafif Agregaların Özelliklerine Etkisi. Makale. **Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü** Bebek, İstanbul.
- Lane R.O., Best J.F., 1982. Properties and use of fly ash in portland cement concrete. **Concrete International. Detroit,** ACI, pp. 81-92.
- Lee, I., 2002. Complete Stres-Strain Characteristic of High Performance Concrete. **New Jersey Institute of Technology, PhD. Thesis,** New Jersey,119p.
- Orhun M., Günday F., Özden N., Atbas M., 1970. The use of fly ash in Turkey for cement and cement products. **Europa committe on electric power, Symposium on the use of fly ash,** paper B.2.
- Özcan, M., 1997. Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi. **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 135s.**
- Okumuş, N., 2012. Zeolit ve Silika Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Geçirimlilik Özellikleri. **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi,** 26(2), ss. 57-63, Adana
- Postacıoğlu, B., 1986. Beton. **Matbaa Teknisyenleri Basımevi, c.2,** 404s, İstanbul.
- Ramyar, K., 1993. Effects of Turkish Fly Ashes on the Portland Cement-Fly Ash Systems. **METU, In Civil Engineering, PhD. Thesis,** Ankara, 208p.
- S. Yakaroğlu, Taşunu Kullanımının Beton Özelliklerine Etkisi, Bitirme Projesi, **OGÜ, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,** İnşaat Mühendisliği Bölümü, 1998, Eskişehir, 50s.
- Sevim, U.K., 2003, Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanılabilirliğinin Çimento Hamuru ve Harçlarının Üzerinde Yapılacak

- Deneylerle Araştırılması. **Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, Adana, 303s.
- Sıddıq, R., 2004a. Properties of Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash and San Fibers. **Cement and Concrete Research**, 34:37-42.
- Sıddıq, R., 2004b. Performance Characteristic of High-Volume Class F Fly Ash Concrete. **Cement and Concrete Research**, 34(3):487-493.
- Tanosaki, T., vd., ( 1998 ), Characterization of incineration ashes in Japan, **Journal of research of the Chichibu Onoda Cement Corp.**, Vol.49, No.135,s.145-154.
- TÇMB, 2004. Uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. **Ar-Ge Enstitüsü Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği** Ankara.
- Subaşı, S., 2010. uçucu kül ikameli betonlarda vibrasyon süresinin betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olan etkisi **Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri enstitüsü dergisi**. Kütahya.
- Tokay, M., Erdoğan K. ( 1998 ). Uçucu küllerin karakterizasyonu. **TÇMB/AR-GE/Y 98.3**, Ankara.
- Topçu, İ., 2008. Yapı malzemeleri ve beton. **Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü** syf. 18-25. Eskişehir.
- TS 500 Betonarme yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2000.
- TS EN 450 , 1988 . Betonda kullanılan uçucu kül-Tarifler özellikler ve kalite kontrolü. **TSE**, Ankara.
- TS EN 206-1 Beton- Bölüm1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri **TSE**, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2002. Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 5:Deney numunelerinin eğilme dayanımlarının tayini. **TSE**, Ankara.
- TS 639, 1998. Uçucu Küller. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 12390-4, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 4: Basınç Dayanımı- Deney Makinelerinin Özellikleri. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 3624, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 2428 EN 1341, 2005, Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 639, 1998. Uçucu Küller. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 12390-2, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2002. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 3624, 1981. Sertleşmiş Betonda Özgül Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı Tayin Metodu. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 699, 2000. Tabii Yapı Taşları-Muayene ve Deney Metotları. **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara.

- TS EN 450, 1998. Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 639, 1998. Uçucu Küller. **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 25, 1975. Tras. **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- TS 706, 1980. Beton Agregaları. **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- TS EN 1008, 2003. Beton-Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su da Dahil Olmak Üzere Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. **Türk Standardları Enstitüsü**, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan B., Katnaş F., Yeğinobalı A., 2003. Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri. **TÇMB**, Ankara, s.76.
- Turanlı, L., Erdoğan, T.Y. ve Karaer, K., 1997. Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Kül Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkileri. **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması-3 Bildiriler Kitabı**, Eskişehir, s.283-293.
- Tunçbilek, B., 1998. Effects of Some Turkish Fly Ashes on the Properties of Portland Cement-Fly Ash Pastes and Mortars. **METU The Department of Civil Engineering**, Master of Science, Ankara, 118p.
- Ünal, O., 2004. Afyon Mermer Tozu ve Soma Uçucu Kül Katkılı Betonların Donma-Çözülme Özellikleri ve Ekonomik Değerlendirilmesi. **Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu**, 13-14 Mayıs 2004, İzmir.
- Wang, A., Zhang, C., Sun, W., 2004. Fly Ash Effects-II. The Active Effect of Fly Ash. **Cement and Concrete Research**, 34:2057-2060.
- Yazıcı, H., 2004. Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül- Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi. **DEÜ, FBE**, İzmir.
- Yazıcı, Ş., Baradan, B., 1995. Uçucu Kül Katkılı Yüksek Dayanımlı Beton. **Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, Bildiriler Kitabı**, Ankara, s.59-71.
- Yeğinobalı, A., Betonun İç Yapısı ( Çimento Hamuru- Agrega-Arayüzeyi ve Özellik İlişkileri), **TÇMB Çimento ve Beton Araştırma-Geliştirme Enstitüsü Seminer Notları, No. 3**, s. 14, Ankara, 1999.
- Yğiter. H., C tipi uçucu kül katkılı betonların bazı fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması.**Dokuz Eylül Üniversitesi.**, 2004. İzmir.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yazar 1989 yılında Kadirli’ de doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Liseyi Kadirli’ de tamamladı. Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nü 2007 yılında kazandı. Üniversiteden 2012 yılında “İnşaat Mühendisi” unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. Halen Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmalarına devam etmektedir.