

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇAYIRHAN UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN  
MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİSİ VE ETKİNLİK  
FAKTÖRÜNÜN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Cem Salih TUYGUN**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**MAYIS 2002**

**ÇAYIRHAN UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN  
MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİSİ VE ETKİNLİK  
FAKTÖRÜNÜN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Cem Salih TUYGUN  
(501991337)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13 Mayıs 2002  
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2002**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet UYAN  
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü.)  
Yrd. Doç. Dr. Hasan YILDIRIM (İ.T.Ü.)**

**MAYIS 2002**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında deneyimleriyle ve değerli fikirleriyle bana yol gösteren, çalışmamın her aşamasında yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet UYAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışma sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Araştırma Görevlisi Bekir PEKMEZCİ'ye teşekkür ederim.

İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Anabilim Dalı'ndaki hocalarıma, araştırma görevlisi arkadaşlarıma ve laboratuvar personeline samimi yardım ve desteklerinden dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Çalışmam sırasında bana maddi ve manevi olarak destek veren Sayın Neval ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Öğrenimimin bu aşamasına gelmemde ailemin göstermiş olduğu ilgi, şefkat ve maddi manevi her türlü yardımlarından dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2002

Cem Salih TUYGUN

## 1. İÇİNDEKİLER

|                                                                         |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>KISALTMALAR</b>                                                      | <b>v</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                    | <b>vi</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                    | <b>vii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                   | <b>ix</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                             | <b>x</b>   |
| <b>SUMMARY</b>                                                          | <b>xii</b> |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                         | <b>1</b>   |
| 1.1. Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırması                             | 3          |
| 1.2. Puzolanik Reaksiyon                                                | 4          |
| 1.3. Uçucu Küller                                                       | 6          |
| 1.3.1. Uçucu küllerin özellikleri                                       | 7          |
| 1.3.1.1. Uçucu küllerin kimyasal ve mineralojik özellikleri             | 8          |
| 1.3.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri                            | 9          |
| 1.3.2. Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi                   | 10         |
| 1.3.2.1. İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme                            | 10         |
| 1.3.2.2. Priz süresi                                                    | 12         |
| 1.3.2.3. Hidratasyon ısısı ve sıcaklık yükselmesi                       | 13         |
| 1.3.2.4. Hava sürüklenme                                                | 14         |
| 1.3.3. Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi             | 15         |
| 1.3.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemetleri             | 15         |
| 1.3.3.2. Elastisite modülü                                              | 17         |
| 1.3.3.3. Sünme ve rötre                                                 | 18         |
| 1.3.4. Uçucu küllerin ortam şartlarına dayanıklılık özellikleri         | 18         |
| 1.3.4.1. Geçirimlilik                                                   | 19         |
| 1.3.4.2. Zararlı kimyasallara dayanıklılık                              | 19         |
| 1.3.4.3. Alkali-agrega reaksiyonu                                       | 20         |
| 1.3.4.4. Donma çözülme dayanıklılığı                                    | 21         |
| 1.3.4.5. Deniz ortamına dayanıklılık                                    | 21         |
| 1.3.4.6. Donatı korozyonu                                               | 22         |
| 1.4. Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodları                  | 22         |
| 1.4.1. Çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılması            | 24         |
| 1.4.2. Uçucu külün ince agrega olarak kullanılması                      | 24         |
| 1.4.3. Uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine konulması | 25         |
| 1.4.3.1. Modifiye edilmiş ikame metodu                                  | 25         |

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1.4.3.2. Rasyonel oranlama metodu                                      | 25        |
| 1.5. k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmaları              | 28        |
| <b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>                                          | <b>35</b> |
| 2.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı                                       | 35        |
| 2.2. Üretilen Betonların Özellikleri                                   | 35        |
| 2.3. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri                               | 36        |
| 2.3.1. Çimento                                                         | 36        |
| 2.3.2. Agregalar                                                       | 37        |
| 2.3.3. Uçucu kül özellikleri                                           | 39        |
| 2.4. Beton Karışımları                                                 | 40        |
| 2.5. Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama, Numune Boyutları | 40        |
| 2.6. Taze Beton Deneyleri                                              | 41        |
| 2.7. Sertleşmiş Beton Deneyleri                                        | 41        |
| <b>3. DENEY SONUÇLARI</b>                                              | <b>43</b> |
| 3.1. Taze Beton Deney Sonuçları                                        | 43        |
| 3.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları                                  | 44        |
| 3.2.1. Basınç dayanımı                                                 | 44        |
| 3.2.2. Ultrases hızı                                                   | 45        |
| 3.2.3. k etkinlik faktörünün belirlenmesi                              | 45        |
| <b>4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ</b>                         | <b>49</b> |
| 4.1. Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi                   | 49        |
| 4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi             | 50        |
| 4.2.1. Basınç dayanımı sonuçlarının irdelenmesi                        | 50        |
| 4.2.2. Ultrases hızı sonuçlarının irdelenmesi                          | 56        |
| 4.2.3. k etkinlik faktörünün irdelenmesi                               | 61        |
| <b>5. SONUÇLAR</b>                                                     | <b>68</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                       | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                                        | <b>76</b> |

## **KISALTMALAR**

|             |                                              |
|-------------|----------------------------------------------|
| <b>ASTM</b> | : American Society For Testing and Materials |
| <b>BS</b>   | : Beton Sınıfı                               |
| <b>TS</b>   | : Türk Standartları                          |
| <b>ACI</b>  | : American Concrete Institute                |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                           | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 1.1.</b> 1986-1987 yılları arasında bazı ülkelerdeki uçucu kül üretim ve tüketim miktarları.....                                                 | 7               |
| <b>Tablo 1.2.</b> F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....                                                 | 9               |
| <b>Tablo 2.1.</b> Üretilen betonların isimlendirilmesi.....                                                                                               | 36              |
| <b>Tablo 2.2.</b> PÇ 42,5 portland çimentosunun kimyasal özellikleri.....                                                                                 | 37              |
| <b>Tablo 2.3.</b> PÇ 42,5 portland çimentosunun fiziksel özellikleri.....                                                                                 | 37              |
| <b>Tablo 2.4.</b> PÇ 42,5 portland çimentosunun mekanik özellikleri.....                                                                                  | 37              |
| <b>Tablo 2.5.</b> Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri.....                                                                               | 38              |
| <b>Tablo 2.6.</b> Agregaların elek analizi sonuçları.....                                                                                                 | 38              |
| <b>Tablo 2.7.</b> Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi.....                                                                                           | 39              |
| <b>Tablo 2.8.</b> Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri.....                                                                                        | 40              |
| <b>Tablo 2.9.</b> Çayırhan uçucu külünün pozolanik aktivite endeksi.....                                                                                  | 40              |
| <b>Tablo 2.10.</b> Üretilen betonların gerçek bileşimleri (1 m <sup>3</sup> karışıma giren malzemeler).....                                               | 42              |
| <b>Tablo 3.1.</b> Taze beton deney sonuçları.....                                                                                                         | 43              |
| <b>Tablo 3.2.</b> Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri ..                                                                            | 44              |
| <b>Tablo 3.3.</b> Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerleri.....                                                                            | 45              |
| <b>Tablo 3.4.</b> Grafikselleştirme yöntemi ile elde edilen k etkinliği faktörü değerleri ...                                                             | 48              |
| <b>Tablo 4.1.</b> Taze betonun çökme ve Ve-Be deneyi sonuçları .....                                                                                      | 49              |
| <b>Tablo 4.2.</b> Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması ..... | 51              |
| <b>Tablo 4.3.</b> Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin uçucu kül kullanım yüzdesine göre yüzdesel olarak karşılaştırılması.....   | 55              |
| <b>Tablo 4.4.</b> Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması.....    | 56              |
| <b>Tablo 4.5.</b> Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin uçucu kül kullanım yüzdesine göre yüzdesel olarak karşılaştırılması.....     | 61              |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                              | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Şekil 1.1</b> : Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı değişimi.....                         | 6                      |
| <b>Şekil 1.2</b> : Yüksek kireçli C sınıfı uçucu kül(A), düşük kireçli F sınıfı uçucu kül(B) ve düşük kireçli uçucu kül içerisindeki, kırılmış plerosfer(C) için elektron mikrografları..... | 10                     |
| <b>Şekil 1.3</b> : Uçucu küllü ve kontrol betonları için basınç dayanımı-zaman grafiği.....                                                                                                  | 17                     |
| <b>Şekil 1.4</b> : $\Delta E$ değerinin belirlenmesi için basınç dayanımı - su/bağlayıcı madde oranı diagramı.....                                                                           | 31                     |
| <b>Şekil 1.5</b> : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi - $k_p$ diagramı.....                                                                                                                     | 32                     |
| <b>Şekil 1.6</b> : Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi - etkinlik faktörü ( $k=k_e+k_p$ ) diagramı.....                                                                                          | 32                     |
| <b>Şekil 2.1</b> : TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri.....                                                                                                                     | 38                     |
| <b>Şekil 3.1</b> : k etkinlik faktörünün belirlenmesinde izlenen grafiksel metod ..                                                                                                          | 46                     |
| <b>Şekil 3.2</b> : 28 günlük $23\pm 2^\circ C$ su içerisinde saklanmış, 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş %30 uçucu küllü numunede k etkinlik faktörünün belirlenmesi.....         | 47                     |
| <b>Şekil 4.1</b> : 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri...                                                     | 51                     |
| <b>Şekil 4.2</b> : 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri...                                                     | 52                     |
| <b>Şekil 4.3</b> : 0,70 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri...                                                     | 52                     |
| <b>Şekil 4.4</b> : 0,80 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri...                                                     | 53                     |
| <b>Şekil 4.5</b> : 0,90 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri...                                                     | 54                     |
| <b>Şekil 4.6</b> : 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri.....                                                     | 57                     |
| <b>Şekil 4.7</b> : 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri.....                                                     | 58                     |
| <b>Şekil 4.8</b> : 0,70 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri.....                                                     | 58                     |
| <b>Şekil 4.9</b> : 0,80 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri.....                                                     | 59                     |
| <b>Şekil 4.10</b> : 0,90 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri.....                                                    | 59                     |
| <b>Şekil 4.11</b> : Farklı kür koşullarındaki numunelerin 7. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi grafikleri.....                                                      | 62                     |

|                   |                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.12</b> | : Farklı kür koşullarındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi grafikleri.....                                            | 63 |
| <b>Şekil 4.13</b> | : Farklı kür koşullarındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü-uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi grafikleri.....                                            | 64 |
| <b>Şekil 4.14</b> | : Babu ve Rao ile bu tez çalışmasında elde edilmiş olan 28. günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi grafikleri karşılaştırması..... | 66 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| <b>C</b>                     | : Çimento            |
| <b>S</b>                     | : Su                 |
| <b>K</b>                     | : Uçucu Kül          |
| <b>k</b>                     | : k etkinlik faktörü |
| <b><math>\sigma_b</math></b> | : Basınç Mukavemeti  |

## **ÇAYIRHAN UÇUCU KÜLÜNÜN BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ VE ETKİNLİK FAKTÖRÜNÜN İNCELENMESİ**

### **ÖZET**

Uçucu küller, termik santrallarda kullanılan kömürlerin atık yan ürünleridir. Kendi başlarına bağlayıcı özellik göstermeyen uçucu küller, çimento ile birlikte beton karışımına eklendiklerinde çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kireci kullanarak bağlayıcı özellik kazanmaktadırlar. Mineral katkı olarak adlandırılan uçucu küllerin işlenebilirliği artırma, çimento miktarını azaltarak maliyeti düşürme, İleriyaş mukavemetini artırma, durabiliteyi iyileştirme, hidrasyon ısını düşürme gibi olumlu yönleri olduğu gibi, erken yaşlardaki betonun basınç dayanımını azaltma gibi olumsuz yönleri olduğu bilinmektedir.

Yapılmış olan bu tez çalışmasında uçucu küllerin betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmekte, basınç dayanımına bağlı olarak uçucu külün k etkinlik faktörü bulunmakta ve uçucu külün yerleştirme yüzdesine bağlı olarak k etkinlik faktörü değerleri irdelenmektedir.

Çalışma sırasında Çayırhan termik santralından elde edilen ASTM C 618'e göre C sınıfı uçucu kül ve PÇ-42,5 çimento kullanılmıştır. Beton karışımından belirli oranda çıkarılan (%10, %30 ve %50) çimentonun yerine ağırlıkça aynı miktarda uçucu kül eklenerek farklı oranlarda su/bağlayıcı madde oranına sahip (0,50, 0,60, 0,70, 0,80 ve 0,90) betonlar üretilmiştir.

350kg/m<sup>3</sup> dozlu bağlayıcı madde kullanılarak yapılmış olan çalışmada kontrol betonunda olmak üzere 4 farklı uçucu kül yerleştirme yüzdesi ve 5 farklı su/bağlayıcı madde oranı kullanılarak 20 seri beton üretilmiştir. Her seride 12 tane olmak üzere 240 adet 15x15x15 boyutlarında numune üretilmiştir. Üretilmiş olan betonlar, 23±2°C su içerisinde ve 20°C ile 65±5 rutubetli ortam olmak üzere iki farklı kür koşulunda saklanmıştır.

Su/bağlayıcı madde oranının ve agrega granülometrisinin sabit olduğu çalışmada maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. İşlenebilirlik ise sabit değil değişkendir.

Taze beton deneyleri olarak, çökme, taze birim ağırlık ve hava miktarı, sertleşmiş beton deneyleri olarak ise 7., 28. ve 90. günler sonunda su ve rutubetli ortamdaki numuneler üzerinde basınç dayanımı ve ultrases deneyleri yapılmıştır. Elde edilen basınç dayanımı değerleri kullanılarak uçucu küle ait farklı yerleştirme yüzdelilerindeki k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

Deneyler sonucunda, uçucu külün betondaki işlenebilirliği arttırdığı, su ihtiyacını azalttığı gözlemlenmiştir. Uçucu küllü betonların kontrol betonuna oranla erken yaşlarda düşük dayanım verdiği, rutubetli kür koşullarında etkinliğinin azaldığı görülmüştür. k etkinlik faktörünün ise uçucu küllerin yer değiştirme yüzdesine bağlı olduğu bulunmuştur. Böylece uçucu küller için basit bir k değil yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak değişen bir k etkinlik faktörünün belirlenmesi bu çalışmadan çıkan en önemli sonuçtur. Özellikle düşük yüzdeli uçucu kül kullanımı ile betondaki

28. gün ve sonrasındaki basınç dayanımı değerleri, kontrol betonununkine yakın veya üzerinde değerler almaktadır. Ultrases deneyleri sonucunda ise uçucu küllerin betondaki boşluk miktarını azalttığı ve daha dolu beton üretilmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. %50 yüksek yüzdeli uçucu kül kullanımı ise beton üzerinde mekanik özellikler açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

## **MECHANICAL PROPERTIES AND EFFICENCY FACTOR OF CAYIRHAN FLY ASH**

### **SUMMARY**

Fly ash is a by-product of the combustion of coal in thermal power plants. It is a pozzolan that is a siliceous or siliceous and aliminious material, which itself possesses little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties. The pozzolans call as mineral admixtures so fly ashes that their workability is high and they reduces the amount of cement when they are used in concrete. So fly ashes can be used as reducing the cost, having long-term strength, better durability, reducing hydration temperature but fly ash concretes gives lower strengths in early ages.

In this study the mechanical properties of fly ash is investigated and k efficiency factor is founded for different usage percentages of fly ash by using the compressive strenghts of fly ash concretes.

In the study, Çayırhan C class fly ash for ASTM C 618 and PC 42,5 cement are used. Some amount of cement (%10, %30 and %50) is taken out from the mixture and the same amount of fly ash is added to the mixture when the water/cementitious material ratio varies (0,50, 0,60, 0,70, 0,80 and 0,90).

350 kg/m<sup>3</sup> dosage cementitious material is used in the mixture. By using 4 different fly ash replacemet percentage and 5 different water/cementitious material ratio also having control concrete, 20 sries concrete had produced. There are 240 specimens in the sum as in each series have 12 15x15x15 cubes. The produced specimens are cured in 23±2<sup>0</sup>C water and 20<sup>0</sup>C with 65±5 moistured air.

Maximum aggregate size is selected as 32 mm and aggregate granulometry is constant. The water/cementitious material ratio is also contant but the workability is not constant and varies.

Slump, Ve-Be, fresh density and air content experiments are made on the fresh concrete. In 7., 28. and 90. days compressive strength and ultrasound velocity is measured on the hardened concrete. With using the compressive strengths k efficiency factors of the fly ash are calculated for each replacement percentages.

As a result of fresh concrete experiments it is founded that fly ash improves the workability and reduces the water demend of concrete. When fly ash concretes are compared with control concretes iti founded that fly ash concretes gives lower strengths at lower term ages and the efficiency of the fly ash lowers by curing in air as a result of compressive strength experiments. It is also founded that k efficiency factor varies with fly ash replacement percentage. Especially of using low fly ash concretes 28. day and after ages' strength values reaches or passes the control concrete's values. When the ultrasound velocity values investigated it is seen that fly ash reduces the amount of space in concrete and produces more fully concrete than

the control concrete. Using of %50 high fly ash concrete gives worse results than control concrete for both compressive and ultrasound velocity experiments in air and water curing conditions.

## 1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğindeki en önemli yapı malzemesi olan beton, agrega denilen kum, çakıl, mıcır gibi mineral malzemeler ile onları yapıştıran çimento ve suyun karıştırılmasından meydana gelmektedir. Çimento, beton içerisinde bağlayıcı malzeme olarak kullanılmakta olup, tarihte çeşitli gelişimler gösteren puzolanlardan sonra gelen son noktadır. Tarihte alçı ve kireç kullanan insanoğlunun su içerisinde priz yaparken su etkisiyle erimeyen bağlayıcı madde arayışları, ilk olarak camlaşmış silis içeren toprakların kireçle karıştırılmaları ile kısmen elde edilmiştir. Eski Mısır'da ve Önyasya'da tuğlanın, öğütülerek kirece katılması düşünülmüş, böylece elde edilen harca horasan denilmiştir. Bu karışım, daha sonra Osmanlılar tarafından geniş ölçüde ve bilinçli olarak kullanılmıştır. Avrupa'da ise Romalılar, Napoli civarındaki Puzzoli kasabasının camlaşmış volkan toprağını kullanmışlardır. 1824 yılında, İngiliz inşaatçısı Joseph Aspdin, kil ve kalker karışımını pişirerek elde ettiği bağlayıcıya "portland çimentosu" adını vererek ilk patentini almıştır. 1835 yılında, Isaac Charles Johnson, pişirme sıcaklığını yükselterek ve öğütmeye önem vererek günümüz portland çimentosunu keşfetmiş oldu. Kalker ve kil karışımının 1400°C'ye kadar ısıtılarak, içine ergimeyi kolaylaştırmak için demir filizi içeren toprak katılması, meydana gelen klinker denen granüle %3 oranında alçıtaşının ilave edilmesi ve en son olarak bunun çok ince öğütülmesi çimentonun üretim aşamalarını oluşturmaktadır [1,2]. Çimentonun keşfinin ardından, zaman içerisinde priz, hidrasyon ısı, sünme, rötre v.b. olaylar açıklanarak günümüz beton teknolojisine ve betonarme yapılara ulaşıldı. Betonun işlenebilirliğinin ve mukavemetinin artması, dış etkilere dayanıklı olması için kimyasal katkıları ve bağlayıcı atıkların kullanılması beton teknolojisinde son yapılan çalışmalardır.

Betonun en önemli yapı taşı olan çimento, maliyetin belirlenmesinde de önemli rol oynamaktadır. Beton teknolojisinde, maliyeti düşürürken verimi arttırmayı hedefleyen çalışmalarda, çimento ile su arasındaki ilişki ve agrega granülometrisinin belirlenmesinin yanında betona eklenen kimyasal ve mineral katkılarda önemli bir etken oluşturmaktadır. Mineral katkılardan olan uçucu küllerin kullanımı, bağlayıcı

atık malzemeler olarak çimento maliyetini düşürmeyi hedeflemektedir. Pulverize kömür ile elektrik üretilen termik santrallerde yakılan kömürün atığı olarak çok ince tanelere sahip olan uçucu kül üretilmektedir. İlk kez 1930 yılında keşfedilen uçucu küller, 1937 yılında Kuzey Amerika'da Davis tarafından beton içerisinde kullanılmıştır. 1948 yılında ise Hungry Horse barajı inşaatında kullanılmıştır. 1977 yılı itibarı ile dünya çapında 278443000 m<sup>3</sup> üretilmiş olan uçucu külün yalnızca %11,4'ü beton teknolojisinde kullanılmıştır [3].

Çimento maliyetini düşürmekte kullanılan uçucu küller, beton özelliklerinde pozitif etkiler de yaratmaktadırlar. Beton içerisinde uçucu kül kullanımı, işlenebilirliği arttırmakta, kullanılan uçucu kül cinsine ve doğru oranlarda kullanılmasına bağlı olarak ileri yaşlardaki mukavemeti arttırmakta ve hidrasyon ısını düşürmektedir. Geçirgenliği düşürerek, durabiliteyi arttıran uçucu küller, bu şekilde betonarme yapılarda çeliğin korozyona karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu özelliklerinin yanında en önemli dezavantajı ise erken yaşlardaki beton mukavemetini düşürmesidir.

Uçucu küller, kömür enerjisinin getirdiği bir yan etken olarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Günümüz teknolojisi, doğanın daha az kirletilmesini ve verimin, artmasını hedeflemektedir. Yapılan çalışmalar, doğayı kirleten atık ürünlerin değerlendirilmesini ve bu ürünlere potansiyel kullanım alanları bulmayı amaçlamaktadır. Bu konuda yeterli potansiyele sahip olan uçucu küllerin endüstrideki kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Bunun içinse uçucu küllerin daha iyi araştırılması ve tanıtılması gerekmektedir.

Yapılan çalışmalar, uçucu küllerin beton içerisindeki kullanım miktarının çok büyük önem arz ettiğini göstermiştir. Uçucu küllerin betona katılması için üç farklı karışım oranlama metodu geliştirilmiştir:

- Basit ikame metodu, çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılmasıdır.
- İlave metodu, uçucu külün ince agrega olarak kullanılmasıdır.
- Kısmi ikame metodu, uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine konulmasıdır. Bu metod kendi içerisinde modifiye edilmiş ikame metodu ve rasyonel oranlama metodu olarak ikiye ayrılmaktadır.

Yapılmış olan bu tez çalışmasında rasyonel oranlama metodu incelenmektedir. İlk defa Smith tarafından ele alınan rasyonel oranlama yaklaşımında, bir k etkinlik

faktörü tanımlanmış ve kullanılmaktadır. k etkinlik faktörü uçucu kül miktarını eşdeğeri çimento miktarına çeviren katsayı olarak tanımlanmaktadır. Uçucu kül etkinlik faktörü, yapılan deneysel çalışmalarda belirli sınırlar içerisinde bir sayı olarak saptanmaya çalışılmış ancak tam bir uzlaşmaya varılamamıştır [3,36]. Tez çalışmasının amacı, k etkinlik faktörünü incelemek ve veriler ışığında bu sabitin grafiksel açıdan karakterini belirlemektir.

Çalışmada, uçucu kütle üretilen betonlarda kullanılan PÇ-42,5, Akçansa fabrikasında üretilmiş çimento kullanılmıştır [4]. Uçucu kül olarak ise Çayırhan uçucu külü kullanılmıştır. Dozaj  $350\text{kg/m}^3$  seçilerek yerdeğiştirmeli olarak (kismi ikame metodu) %10, %30, %50 oranlarında PÇ-42,5 çimentosu çıkarılmış, yerine Çayırhan uçucu külü katılmıştır. Şahit numune ile birlikte bu dört tür betonun herbirinde su/çimento oranları %0,50, %60, %70, %80, %90 alınarak toplam 20 seri beton üretilmiştir. Her karışım için üretilen numunelerin yarısı  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $\pm 5$  rutubetli kür odasında saklanırken, diğer yarısı  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'lik su içinde saklanmıştır. 7., 28., 90. günlerde numuneler üzerinde ultrases ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ışığında uçucu küllerin beton mukavemetine etkisi incelenmiş ve k etkinlik faktörünün belirlenmesi için grafiksel çalışmalar yapılmıştır.

### 1.1 Puzolanların Tanımı ve Sınıflandırması

Puzolanlar, ilk kez hidrolik bağlayıcı olarak Romalılar ve Yunanlılar tarafından geliştirilmiştir. Eski çağlarda harcı hazırlamak için, kireç, kum ve su karıştırılmaktaydı. Romalılar, Santorin ve Napoli yakınlarındaki Vezüv yanardağlarının patlaması ile volkanik küllerle tanışmış oldular. Vezüv yanardağı eteklerindeki Puzzoli kasabasında ilk kez bu volkanik küller kireç, kum ve su ile hazırlanan harca karıştırılarak kullanılmıştır. Puzolan ismi, bu kasabadan gelmektedir. Doğal puzolan olarak bilinen bu volkanik küllerle çok iyi sonuç elde eden Romalılar, bu harcı kolezyum gibi yapılarda kullanmışlardır [5].

Bileşiminde  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  v.b. içeren puzolanlar, portland çimentosuna benzemelerine rağmen genellikle kendi başlarına bağlayıcılık özelliği içermezler. Günümüzde portland çimentosu içerisinde veya beton karışımına katılarak kullanılan puzolanlar, betonun fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmektedirler. Çimentoya oranla daha ucuz olmaları, kullanımlarını cazip hale getirmekte, ayrıca beton özelliklerini olumlu yönde değiştirebilmektedirler. Beton

içerisinde katkı olarak kullanılmaları, mineral katkıları olarak adlandırılmalarına neden olmuştur [6].

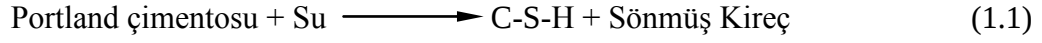
ASTM C618 standardına göre puzolanlar, ince toz halinde silisli veya silis alüminli malzemeler olup, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip, bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkarmaktadır [7]. Puzolanlar, bu özelliklere sahip olarak doğada bulunabildikleri gibi, yapay olarak da üretilmektedir. Enerji santrallerinin yakıt olarak kömür ve pirinç kapçığı kullanılmasıyla ortaya çıkan atıklar ile pik demir, bakır, çelik, kurşun, nikel, silikon ve ferrosilikon üretimi ile ortaya çıkan atıklar, başlıca yapay puzolan kaynaklarıdır. Bu puzolanlar, ince agrega olarak beton içerisinde kullanılabildiği gibi, çimento ve beton içerisine bağlayıcı olarak da katılarak kullanılabilmektedir. Mineral katkıların sınıflandırılması, aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir [6,8]:

- Doğal puzolanlar
  - Volkanik camlar
  - Volkanik tüfler
  - Kalsine kil ve şeyl
  - Diatomit
- Yapay puzolanlar
  - Uçucu küller
  - Pirinç kapçığı külü
  - Silis dumanı
  - Yüksek fırın cürufu
  - Demirli olmayan cüruflar

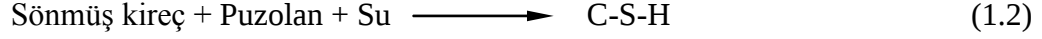
## 1.2 Puzolanik Reaksiyon

$C_2S$  ve  $C_3S$  olarak adlandırılan  $2CaO.SiO_2$  ve  $3CaO.SiO_2$  silikatları, çimentonun esas iskeletini oluşturmaktadır. Bu silikatlar, su ile birleştiğinde C-S-H (kalsiyum silikat hidrate ( $3CaO.2SiO_2.3H_2O$ )) ve sönmüş kireç ( $Ca(OH)_2$ ) oluşturmaktadırlar. Bu reaksiyon sonucu oluşan C-S-H, betondaki asıl bağlayıcılık özelliğini vermektedir. Çimento içerisinde kullanılan veya betona mineral katkı olarak eklenen puzolanlar

ise, bağlayıcı özelliğini veren C-S-H'ı üretmek için sönmüş  $\text{Ca(OH)}_2$ 'e ihtiyaç duyarlar. Portland çimentosu ve puzolanlar için bu denklemler şöyledir [9]:



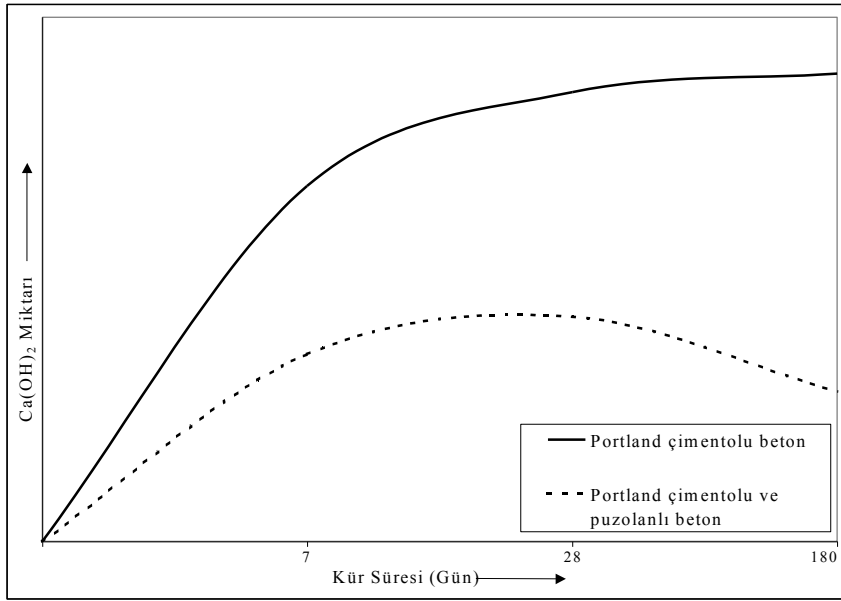
(Portland çimentosu hidratasyonu)



(Puzolanik reaksiyon)

Denklemlerden görüldüğü üzere portland çimentosu, bağlayıcılık özelliği veren C-S-H ile birlikte serbest kireç üretmekte, puzolanlar ise kireci kullanarak C-S-H üretmektedir. Bu nedenle, beton içerisindeki puzolanlar, portland çimentosunun hidratasyonu ile üretilen kireci kullanabilmektedir [9]. Portland çimentosu içerisinde bulunan  $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$ , hidratasyon sonucu çok miktarda  $\text{Ca(OH)}_2$  çıkarır. Bu kirecin varlığı ise, beton için iyi anlam ifade etmez. Kireç, su içinde çözünür, yeri boş kalır ve betonun mukavemeti boşluklu yapısından dolayı düşer. Su beton içerisine kolaylıkla girer ve hasara yol açar. Bu açıdan bakıldığında, puzolanların bu kireci kullanarak, betonun bağlayıcılık özelliğini veren C-S-H üretmesi, puzolanların beton karışımı içerisinde kullanımı açısından bir avantajdır. Ancak puzolanik reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu, puzolanik reaksiyon etkisi nedeniyle mukavemet kazanımı da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artırılması, bazı kimyasal katkı maddelerinin kullanılması ile bu reaksiyon hızlandırılabilir. Zamana bağlı olarak, puzolan ve portland çimentosu karışımı ile yalnız portland çimentosunun kullanıldığı betonlar karışımlarında serbest kireç miktarı değişimi, Şekil 1.1'de gösterilmiştir [1,8,9].

Puzolan katkılı üretilen betonlarda daha çok bağlayıcı ürün oluşması, mukavemet artışına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi, geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır. Ayrıca, puzolanik reaksiyon sonucu oluşan C-S-H'daki C/S oranı, daha düşük olmaktadır. Puzolanların betonun zararlı kimyasallara dayanıklılığını arttırması ve alkali-agrega reaksiyonunda zarar görme riskini azaltması, bu faktöre bağlanmaktadır [1,8].



Şekil 1.1 Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı değişimi

Puzolanik reaksiyonun yavaş olması ve hidrasyon ısını düşürmesi, kütle beton üretiminde puzolanların kullanımını cazip kılmaktadır. Maliyet olarak çimentodan daha ucuz olan puzolanların inşaat teknolojisinde kullanımı yaygınlaşmaktadır.

### 1.3 Uçucu Küller

İnşaat teknolojisinde en sık kullanılan puzolanlar, uçucu küllerdir. Modern enerji santrallerinde kömür, yüksek ısıdaki fırınlardan geçirilir. Uçucu maddeler ve karbon yanarak yok olurken, kömür içerisindeki kil, kuvarz ve feldspatlar eriyerek birleşirler. Bu ergimiş madde, düşük sıcaklıktaki kısımlarda soğutulup katılaştırılarak küresel parçacıklara dönüşür. Bu mineral maddenin bir kısmı, tabanda bir kül yığını olarak toplanırken, büyük çoğunluğu, uçucu gazlarla birlikte uçarlar. Bu uçucu kısım, uçucu kül olarak adlandırılır. Uçucu küller, hava kirliliğini önlemek amacıyla baca çıkışlarında elektrostatik çöktürücülerle gazdan ayrılarak toplanırlar [6]. TS EN 450' deki tanıma göre uçucu küller, pulverize kömürün yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ten meydana gelen, reaktif  $\text{SiO}_2$  muhtevası kütlece en az %25 olan, başlıca küresel ve camsı taneciklerin ince tozudur. Yine, TS EN 450' ye göre uçucu kül, pulverize edilmiş antrasit, linyit veya bitümlü kömürün yakıldığı fırınların baca gazlarındaki toz benzeri taneciklerin elektrostatik veya mekanik çöktürülmesi ile elde edilir [4].

Temel olarak, endüstri atığı olan uçucu küller, doğayı kirletmektedirler. Depolanma konusunda çıkan problemleri azaltmak ve çevreye vereceği zararı önlemek amacıyla, uçucu küllerin sahip olduğu pozolanik özellikler gözönüne alınarak, beton teknolojisinde uçucu kül kullanımının yaygınlaştırılması, hem ekonomik, hem beton üretiminde kazandıracığı avantajlar, hem de çevre kirliliğini önlemek açısından önemlidir.

Uçucu küller, ilk olarak 1930 yılında elektrik enerjisi endüstrisinde keşfedilmiştir. 1937 yılında, Kuzey Amerika’da, Kaliforniya Üniversitesi’nde, R.E.Davis tarafından beton içerisinde kullanılarak, ilk deneysel sonuçlar elde edilmiştir. 1948 yılında, Hungry Horse barajı inşaatında kullanımı ile inşaat teknolojisindeki kullanımı başlamıştır [3]. 1986-1987 yılları itibarı ile dünyada uçucu kül üretimi, bazı ülkeler için Tablo 1.1’de gösterilmiştir [10].

Tablo 1.1 1986-1987 yılları arasında bazı ülkelerdeki uçucu kül üretim ve tüketim miktarları

| ÜLKE         | Uçucu Kül Üretim Miktarı<br>(1000*ton) | Uçucu Kül Tüketim Miktarı<br>(1000*ton) | Uçucu Kül Kullanım<br>Yüzdesi (%) |
|--------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Çin          | 41000                                  | 9500                                    | 23                                |
| Çekoslovakya | 16300                                  | 570                                     | 3                                 |
| İngiltere    | 10363                                  | 5922                                    | 57                                |
| Almanya      | 24700                                  | 5895                                    | 24                                |
| Hindistan    | 38500                                  | 1150                                    | 3                                 |
| Polonya      | 15000                                  | 5512                                    | 37                                |
| Güney Afrika | 12770                                  | 580                                     | 5                                 |
| A.B.D.       | 38300                                  | 7960                                    | 21                                |
| Rusya        | 80000                                  | -                                       | -                                 |
| Yugoslavya   | 12000                                  | 625                                     | 5                                 |
| Türkiye      | 430                                    | 10                                      | 2                                 |

Tablo 1.1’de görüldüğü üzere, ülkemizde 1986 yılı itibarı ile uçucu kül üretimi ve kullanımı, nispeten azdır. Ancak günümüzde bu değerler artmaktadır. Uçucu kül özelliklerinin daha bilinçli şekilde araştırılması ile birlikte uçucu kül kullanımına olan güven artmaktadır. Uçucu küller, mineral katkı olarak kullanılmasının yanında çimento içerisinde, hafif agrega olarak, kiremit ve seramik üretiminde, beton bloklarda, dolgu malzemesi olarak, yol stabilizasyonunda, asfalt macununda ve zırai amaçlarla da kullanılmaktadır [10].

### 1.3.1 Uçucu Küllerin Özellikleri

Uçucu küllerin beton teknolojisinde en yaygın kullanım nedenleri, maliyetin düşürülmesi, işlenebilirliği arttırmak, hidratasyon ısını düşürmek ve ileri yaşlardaki

mukavemeti arttırmaktır. Uçucu kül özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesi, betonda hedeflenen amaçlara ulaşmak için önemlidir. Bu özellikler, uçucu külün üretildiği santralde kullanılan kömürün cinsine, kömürün yakılış ve toplanma şekline bağlı olarak değişmektedir. Aynı şartlar içerisinde üretim yapan santrallardan alınan uçucu küllerin özellikleri, önemli ölçüde değişmemektedir. Bu nedenle uçucu kül kullanımında aynı şartlarda üretim yapan santrallar kullanılmalı ve bu özellikler iyi belirlenip, incelenmelidir.

#### **1.3.1.1 Uçucu Küllerin Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri**

Uçucu küller, camsı ve kristal formların heterojen birleşimlerinden oluşmaktadır. İçerdiği birleşikler, oksit olarak bulunursa da kimyasal analiz sonuçlarının açıklanması açısından oksit halleri kullanılmaktadır. Bu analizlere göre içeriği, büyük ölçüde silisyum ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), demir ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), kalsiyum ( $\text{CaO}$ ), magnezyum ( $\text{MgO}$ ) ve sülfür ( $\text{SO}_3$ ) elementlerinden oluşan kimyasal bileşimlerden ve camsı formlardan oluşmaktadır [11].

İçermiş oldukları  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarlarına göre ASTM C 618 standardında, uçucu küller, F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, antrasit ve bitümlü kömürün yanışından, C sınıfı uçucu küller ise linyitin yanışından elde edilmektedir. Bitümlü ve antrasit kömürünün, linyite oranla daha az kalsiyum içermekte olması, uçucu küller arasında farklı bağlayıcı ve puzolanik özelliklere neden olan bu sınıflandırmayı doğurmuştur. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliklere de sahiptirler. F sınıfı uçucu küller ise su ile yalnız başına karıştırıldıklarında nadiren bağlayıcılık özellik gösterirler [11].

Uçucu küllerin sınıflandırılmasının belirlenmesinde kimyasal özellikleri incelenmektedir. C sınıfı uçucu küllerde aktif bileşik, kalsiyum alumino silikatlı camdır. F sınıfı uçucu küllerde ise aktif bileşik silisli camdır.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  olmak üzere üç ana bileşenin toplamı F sınıfı uçucu küllerde %70 ve üzerinde, C sınıfı uçucu küllerde %50 ve üzerindedir. Bu bileşimlerin C sınıfı küllerde %50 oranında kalmasının nedeni, C sınıfı küllerin %10 ve üzerinde  $\text{CaO}$  içermesidir.  $\text{CaO}$  oranı %10 ve üzerinde olan küller yüksek kireçli, %10'nun altında  $\text{CaO}$  içeren küller ise düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [11]. Tablo 1.2'de C ve F sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine örnek verilmiştir [9].

Tablo 1.2 F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve portland çimentosunun kimyasal özellikleri

| Kimyasal Bileşim                                                                 | Portland Çimentosu (%) | F Sınıfı Uçucu kül (%) | C Sınıfı Uçucu kül (%) |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                                                 | 19,8                   | 43,4                   | 32,5                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                   | 6,1                    | 18,5                   | 21,9                   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                   | 2,5                    | 26,9                   | 5,1                    |
| SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 28,4                   | 88,8                   | 59,5                   |
| CaO                                                                              | 63,7                   | 4,3                    | 27,4                   |
| SO <sub>3</sub>                                                                  | 2,2                    | 1,2                    | 2,8                    |
| MgO                                                                              | 3,5                    | 0,9                    | 4,8                    |
| Toplam Alkaliler (Na <sub>2</sub> O Eşdeğer)                                     | 0,9                    | 0,6                    | 1,1                    |
| Kızdırma Kaybı                                                                   | 1                      | 3,2                    | 1,2                    |
| Rutubet                                                                          | -                      | 0,2                    | 0,8                    |

TS EN 450'ye göre uçucu küllerin kimyasal özellikleri belirtilmiştir. Uçucu küllerde klorür (Cl<sup>-</sup>) muhtevası kütlece % 0,10'dan, kükürt trioksit (SO<sub>3</sub>) muhtevası kütlece % 3'den, serbest kalsiyum oksit (CaO) muhtevası kütlece % 1'den daha büyük olmamalıdır. Bu bileşimlerin dışında yanmamış karbon kalıntısını sınırlamak amacıyla, bir kızdırma kaybı değeri tanımlanmıştır. Buna göre kızdırma kaybı % 5-7'den daha büyük olmamalıdır [4].

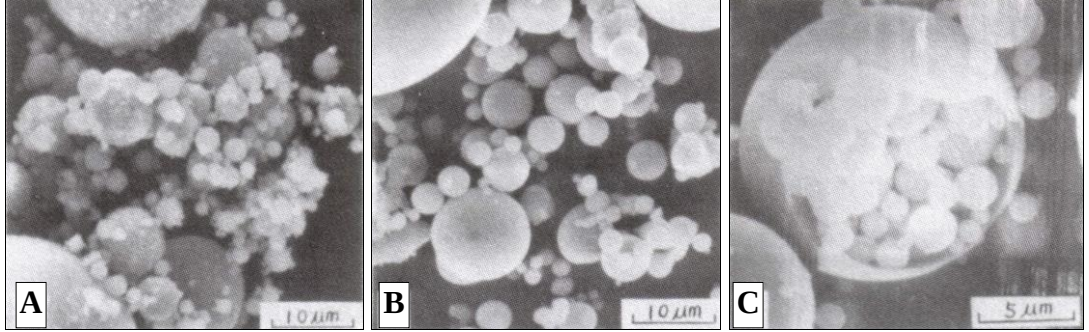
### 1.3.1.2 Uçucu Küllerin Fiziksel Özellikleri

Uçucu küllerin şekli, inceliği, boyut dağılımı, özgül ağırlığı ve bileşimi, beton karışım oranlarını, taze beton özelliklerini ve sertleşmiş betonun mukavemetini etkilemektedir. Uçucu küllerin rengi ise inşaat mühendisliğinde belirleyici olmamakla beraber, üretilmiş oldukları santraldeki kömür cinsinin değişimini, kızdırma kaybını ve yanma koşullarındaki değişikliği gözlemlemede yardımcı olarak, uçucu kül özelliklerinde değişim olup olmadığını anlamamıza yardımcı olabilir [11].

Uçucu küllerin şekli, üretilmiş olduğu kömüre, yanmadan önceki pulverizasyon derecesine, yanma koşullarına ve toplama sistemine bağlıdır. Lane ve Best, 1982'de yaptıkları çalışmalarda uçucu kül şeklinin tanecik boyutunun fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir. Uçucu kül tanecikleri, camsı, katı veya içi boş ve küresel şekildedir. İçi boş küreler, senosfer, küçük kül tanecikleri içeren küreler ise, plerosfer olarak adlandırılırlar [11].

Uçucu kül ile çimentonun birlikte öğütülmesinin, uçucu külün dayanıma katkısını arttırdığı görülmüştür. Öğütme işlemi tanecik boyutunu küçültür, senosferleri kırar ve plerosferler içerisinde daha küçük tanecikler oluşturur. Uçucu kül ve çimento

klinkeri çok fazla öğütülürse bağlayıcı maddenin beton içerisindeki su ihtiyacı artabilir [11]. Şekil 1.2’de C ve F sınıfı uçucu küller ve kırılmış bir plerosfer için mikro fotoğraflar görülmektedir [7].



Şekil 1.2 Yüksek kireçli C sınıfı uçucu kül(A), düşük kireçli F sınıfı uçucu kül(B) ve düşük kireçli uçucu kül içerisindeki, kırılmış plerosfer(C) için elektron mikrografları

Uçucu külün içerdiği küreciklerin çapları 1µm ile 100µm arasında değişmektedir. Puzolan olarak kullanımı uygun olan uçucu kül taneciklerinin büyük kısmının, 325 no’lu (45µm) elekten geçmesi gerekmektedir. Kömür cinsi, kömürün öğütülmesi ve üretim işlemlerinde bir değişiklik olmaması halinde tanecik boyutları sabit kalmaktadır. Lane ve Best’in 1982 yılında yaptığı çalışmalarda, inceliğin artması halinde uçucu külün beton içerisindeki performansının arttığı görülmüştür [11].

Luke’un 1961 yılında yaptığı çalışmalar, uçucu küllerin özgül ağırlıklarının 1,97 ile 3,02 gr/cm<sup>3</sup> arasında değiştiğini göstermektedir. Ancak beton teknolojisinde kullanılan uçucu küllerin özgül ağırlıkları 2,2 ile 2,8 gr/cm<sup>3</sup> arasındadır. Bazı uçucu kül tanecikleri (örneğin senosfer), özgül ağırlığının 1,0 gr/cm<sup>3</sup>’den daha az olması nedeniyle su üzerinde yüzebilmektedir. Yüksek özgül ağırlık, ince taneciklerin göstergesi olmaktadır. Roy, Luke ve Diamond’ın 1984 yılında yaptığı çalışmalar, demir bileşeni fazla olan uçucu küllerin yüksek, karbon bileşeni fazla olan uçucu küllerin düşük özgül ağırlığa sahip olduğunu göstermiştir. C sınıfı uçucu küllerin daha ince taneciklere ve daha az senosfere sahip olmasından dolayı özgül ağırlıkları F sınıfı uçucu küllere göre daha yüksektir (2,4-2,8gr/cm<sup>3</sup>) [11].

### 1.3.2 Uçucu Küllerin Taze Beton Özelliklerine Etkisi

#### 1.3.2.1 İşlenebilme, Su İhtiyacı ve Terleme

Taze betonun donatılı kalıplar içerisine rahat bir şekilde yerleşmesi için karışımın akıcı olması, yani işlenebilirliğin iyi olması gerekmektedir. Beton içerisinde

çimentonun hidratasyonu için gerekli su ve çimento taneleri arasında kalacak adsorplanmış jel suyunun miktarı, çimento ağırlığının %25'dir. Ancak pratikte işlenebilirliği arttırmak için bu oran %40'ın altına nadiren düşmektedir. Bu nedenle beton içerisindeki suyu azaltırken işlenebilirliği sabit tutmak önemlidir. Uçucu küllerin işlenebilirliğe katkısı bu açıdan olumlu yönde olmaktadır [1].

Owens'in çalışmaları, uçucu külle üretilen beton karışımlarında, uçucu külün 45µm üzerinde olan taneciklerinin (kaba malzeme) ağırlıkça yüzdesi betonun işlenebilirliğini belirlemektedir. 45µm'den daha büyük tanecik miktarı az olan uçucu küller, aynı işlenebilirlik değerleri için betondaki su ihtiyacını azaltmaktadır [3].

Yapılan çalışmaların sağlıklı olarak incelenmesi açısından tanecik dağılımının belirlenmesinin yanında, uçucu küllerin hangi karışım oranlama metodu ile beton karışımına eklendiği iyi belirlenmelidir. Uçucu küllerin pozolanik bağlayıcı özelliği nedeniyle su ihtiyacını arttıracak göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle beton içerisinde ince agregalar olarak kullanılması, beton karışımının su ihtiyacını arttıracaktır. Basit ikame metodu ile üretilen betonlarda çıkarılan çimentoya eşit miktarda uçucu kül kullanılması, uçucu küllerin işlenebilirliğe katkısının belirlenmesinde referans olarak kullanılabilir. Modifiye edilmiş ikame metodu ve rasyonel oranlama metodu, çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül eklenmesi sebebiyle işlenebilirlik konusunda göreceli sonuçlar vermektedir. İşlenebilirliği etkileyen bir diğer faktör ise kullanılan uçucu küllerin, içerdiği CaO miktarına bağlı olarak farklılık göstermesidir.

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küllerini basit ikame metodu ile yüksek oranlarda beton içerisinde kullanarak deneyler yapmışlar, elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığını ve su ihtiyacını azalttığını söylemişlerdir [12].

Ukita, Shigematsu ve Ishii, düşük kireçli ve tane boyutu 20 ile 5µm arasında ve özgül ağırlığı 2,28 ile 2,51 gr/cm<sup>3</sup> arasında değişen uçucu küllerle basit ikame metodu kullanarak hazırladıkları beton karışımlarında, kontrol betonuna göre işlenebilirliğin arttığını ve su ihtiyacının azaldığını söylemişlerdir [13].

Haque, Day, ve Langan, C sınıfı yüksek kireçli uçucu küllerle basit ikame metodunu kullanarak hava sürükleyici katkı olarak ürettikleri betonlarda, işlenebilirliğin uçucu külsüz olarak üretilen betonlara göre arttığını söylemişlerdir [14]. Yalnızca hava

sürükleyici kullanılarak üretilen betonlara göre uçucu kül kullanımının işlenebilirliği arttırdığı, Samarin ve Ryan'ın 1975 yılında yaptığı çalışmalarda belirtilmektedir [3].

Olek ve Diamond, C ve F sınıfı uçucu küllerle basit ikame metoduyla ürettikleri betonlarda her iki sınıf uçucu külün işlenebilirliği arttırdığını gözlemlemişler, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere göre işlenebilirliği daha fazla arttırdığını söylemişlerdir [15].

Schießl ve Härdtl, yapmış oldukları çalışmalarda, uçucu küllü betonlarda uçucu küllerin inceliğinin artması ile taze betonun işlenebilirliğinin de arttığını söylemişlerdir. Uçucu kül tane şeklinin, inceliği aynı olan, aynı kömürden üretilmiş bazı uçucu küllerde, betonun işlenebilirliğine ihmal edilemeyecek etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir [16].

Terleme, genellikle segregasyon sonucu oluşan, artması halinde erken rötreye neden olan bir durumdur. Segregasyon, üretilen betonun yeterli kohezyona sahip olmamasından kaynaklanmaktadır. Uçucu küllerin inceliğinin fazla oluşu nedeniyle, beton karışımının kohezyonunu arttıracak ve segregasyonu azaltacak, bu nedenle de erken rötreyi engelleyeceği düşünülmektedir [1,3].

Copeland, terleme konusunda yaptığı çalışmalarda, terlemeye eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir [3]. Sivasundaram, Carette ve Malhotra, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettiği betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını belirtmişlerdir [12]. Ukita, Shigematsu ve Ishii ise inceliği fazla olan uçucu küllerle yaptıkları çalışmada yine uçucu küllerin terlemeyi ve segregasyonu azalttığını söylemişlerdir [13].

Terleme ve işlenebilirlik konusunda uçucu küllerin genel olarak iyileştirme sağladığı söylenebilir. Ancak uçucu küllerin inceliği bu konuda en önemli etken olmaktadır.

### **1.3.2.2 Priz Süresi**

Betonda priz süresini etkileyen bir çok faktör bulunmakla beraber genellikle uçucu küllerin priz süresini arttırdığı söylenmektedir. Bunun ana sebebi, uçucu küllerin bağlayıcı özelliklerini kazanabilmeleri ve kimyasal reaksiyona girmeleri için çimentonun prizi ile ortaya çıkan CaO'ya olan ihtiyaçlarıdır.

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, yüksek uçucu kül kullanımı ile priz süresinin arttığını söylemişlerdir [12]. Davis, uçucu kül kullanımının, tüm etkenler sabit

kaldığı takdirde priz süresini arttırdığını belirtmiştir. Lane ve Best, uçucu küllerin prizi geciktirdiğini söylemiş, uçucu kül karışım oranlarının, inceliğinin ve kimyasal bileşiminin bunda etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, çimentonun inceliği, hamurun su miktarı ve ortam sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğunu söylemişlerdir [3].

### **1.3.2.3 Hidratasyon Isısı ve Sıcaklık Yükselmesi**

Hidratasyon ısının belirlenmesi, büyük kütle betonlarının üretiminde önem arz etmektedir. Erken yaşta ortaya çıkan termik rötire, büyük sorunlar yaratır. Kütle betonlarında, iç kısımdaki beton yavaş, dış kısımdaki beton hızlı soğur. Bu şekilde dış kısımdaki betonun büzülmesi önlenirken, çekme gerilmeleri oluşur ve beton çatlar. Termik rötire çatlakları, derin ve geniş olmaktadır. Kütle betonlarının çokça bulunduğu baraj inşaatlarında geçirimsizliğin çok önemli olması nedeniyle, çatlaklı yapıdaki beton kullanılamaz. Termik rötrenin başlıca sebepleri, hidratasyon ısısı yüksek çimento kullanımı, hızlı beton dökümü ve kalınlığı fazla kütle beton dökümüdür. Termik rötreyi engellemek için beton içinde soğutma su boruları geçirilmesi, agregaların ve suyun soğutulması gibi yöntemler kullanılmaktadır [1].

Atiş, F sınıfı uçucu küllerini kullanarak yaptığı çalışmada hidratasyon ısının maksimum değerinin düştüğünü ve uçucu kül miktarının artırılması ile ısı artışının da yavaşladığını gözlemlemiştir. Buradan yola çıkarak, termik rötreden dolayı oluşan büyük çatlakları önlemek amacıyla, büyük oranda uçucu kül içeren betonların baraj inşaatlarında, büyük temellerde ve kısmen nükleer reaktör binalarında kullanılabileceğini söylemiştir [17].

Langley, Carrette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küllerle yapmış oldukları deneylerde yine hidratasyon ısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir [18].

Barrow, Hadchiti ve Carrasquillo, F ve C sınıfı uçucu küller ile dört farklı cins çimentoyu farklı oranlarda karıştırarak beton üretmişler ve uçucu kül cinsinin hidratasyon ısını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Yazarların belirttiği göre, F sınıfı uçucu küller, hidratasyon ısını düşürmekte ve sıcaklık artışını yavaşlatmakta, C sınıfı uçucu küller ise, hidratasyon ısını değiştirmemekle beraber sıcaklık artışını yavaşlatmaktadır [19].

Yapılan alışmalar göstermektedir ki, hidratasyon ısıısını düşürmek amacıyla çimentonun azaltılması ve F sınıfı uçucu kül kullanımı, baraj inşaatlarında hem ekonomik açıdan, hem de pratik açıdan yarar sağlamaktadır. Uçucu küllerin hidratasyon ısıısını düşürmesi, en önemli kullanım avantajları olmakla beraber, en fazla kullanım şekli de bu nedenledir.

#### **1.3.2.4 Hava Sürüklenme**

Beton hamurunun donmaya dayanıklılığının belirlenmesinde hava sürüklenme olayı incelenmelidir. Jel boşluklarının boyutları, angström mertebesinde olduğu için bu boşluklardaki su molekülleri katı yüzlere çekim kuvvetleri ile sıkıca bağlıdırlar ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda dahi kristalleşip donmazlar. Çimento hamurundaki kılcal boşluk sistemi ise, çap ve şekilleri karışımın su/imento oranına, hidratasyon derecesine, imento cinsine ve katkı maddelerine göre değişen ve suyun donması sırasında asıl zararı meydana getiren boşluklardır. Hava sürükleyici katkı maddeleri kullanarak beton içerisine hacmin %4 ile %6'sı oranında küçük kapalı baloncuklar şeklinde dağınık hava boşlukları oluşturulması, hem malzemeyi daha elastiki yaparak buz basınçlarına dayanımları arttırmakta, hem boşluklar kılcal kanalları kestikleri için kılcal su emmeyi azaltmakta, hem de suyun kolay boşalmasına ve hidrostatik basınçların azalmasına imkan verecek boşlukları sağlamaktadır. Soğuk iklim şartlarında açık kalacak betonlarda hava sürükleyen katkılarının kullanılması, günümüzde kural haline gelmiştir [1].

Haque, Day ve Langan, basit ikame metoduyla ürettikleri C sınıfı uçucu küllü betonlarda hava sürükleyici katkı kullanmışlar ve uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkı ihtiyacını arttırdığını görmüşlerdir [14].

Gebler ve Klieger C ve F sınıfı uçucu külleri basit ikame metoduyla beton içerisinde kullanarak ürettikleri betonlarda %6 hava oranını sağlamak için hava sürükleyici katkı kullanmışlardır. Sonuç olarak, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla daha az hava sürükleyici katkıya ihtiyacı olduğu görülmüştür. Her iki uçucu külün de kontrol betonuna göre hava sürükleyici ihtiyacı artmıştır. Yüksek kireçli ve daha az organik madde içeren uçucu küller, daha az hava kaybına neden olmaktadır. Uçucu kül kimyasal özellikleri, organik madde miktarı, karbon miktarı, kızdırma kaybındaki artış ve SO<sub>3</sub> miktarının artışı hava sürükleyici katkı ihtiyacını arttırırken, toplam alkali miktarının artışı ihtiyacı azaltmaktadır. Uçucu kül zgl ağırlığındaki

artışın betondaki hava miktarını arttırmakta olduğu görülmüştür. Samarin ve Ryan'ın yaptığı çalışmalara göre, hava sürükleyici ve uçucu küllerin birlikte beton içerisinde kullanımını terlemeyi azaltmakta ve priz süresini arttırmaktadır [3].

### **1.3.3 Uçucu Küllerin Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi**

#### **1.3.3.1 Mukavemet Kazanımı, Basınç ve Eğilme Mukavemetleri**

Uçucu külle üretilen betonların mukavemet kazanımları, uçucu küllerin kimyasal ve fiziksel özellikleri, tanecik boyutu gibi farklılıkları yanında betona eklenme şekline yani karışım oranlama metodlarına bağlıdır. Sahip oldukları puzolanik bağlayıcı özellikleri nedeniyle betonun mukavemetini önemli ölçüde değiştirirler. Kısmi ikame metodunda esas olarak uçucu küllerin bu özellikleri göz önüne alınarak, çıkarılan çimento miktarından farklı miktarda uçucu kül, beton karışımına eklenmekte ve kontrol betonuyla aynı mukavemete erişilmeye çalışılmaktadır. Puzolanik özelliğinin belirlenerek mukavemet artışının belirlenmesinde, uçucu küllerin basit ikame metoduyla beton karışımına eklenmesi referans alınabilir. Bu şekilde, aynı miktardaki çimento ile uçucu külün mukavemet kazanımları karşılaştırılabilir.

Giaccio, Violini, Zappitelli ve Zerbino üç farklı çimento ve iki farklı F sınıfı uçucu külü, %20 ve %30 oranlarında basit ikame metoduyla kullanarak 0,55 ve 0,40 su/bağlayıcı madde oranlarına sahip betonlar üretmişler, elde ettikleri verilere göre uçucu küllerin erken yaşlardaki beton mukavemetlerini düşürdüğünü söylemişlerdir. Ancak, %20 oranla uçucu küle sahip betonlarda ileriki yaşlardaki dayanımların arttığı, hatta bazen kontrol betonunun basınç dayanımını aştığı belirtilmiştir. İnceliği fazla olan F sınıfı uçucu küllü betonların basınç dayanımları, diğerlerine oranla daha fazla olmuştur. Kontrol betonunun basınç dayanımını aşan bu mukavemet kazanımı üç farklı çimentodan kiminde 270. günde, kiminde 90. günde oluşurken bir diğerinde 56. günde olmuştur [20].

C sınıfı uçucu küller kullanarak çalışmalar yapan, Haque, Day ve Langan, hava sürükleyici kullanmış ve numuneleri farklı kür koşullarında saklayarak veriler elde etmişlerdir. Buna göre uçucun külün cinsine bağlı olmakla beraber, uçucu külün etkinliği, eklenme miktarı arttıkça azalmaktadır. İki farklı C sınıfı uçucu külün kullanıldığı çalışmada, küllerden biri %20, diğeri %35 oranlarında basit ikame metoduyla betona eklendiğinde, 180. gündeki basınç dayanımları, kontrol betonununkine yaklaşmakta iken, daha önceki dayanımları düşük olmaktadır. Uçucu

küllü betonların ilk yaşlardaki dayanımlarının düşük olması puzolanik aktiviteye bağlanmaktadır. Yapılan çalışmada düşük ve orta mukavemetli betonlarda uçucu kül kullanımının, beton dayanımını ileriki yaşlarda da olsa kontrol betonuna göre arttırdığı görülürken, yüksek mukavemetli betonlarda bu gözlemlenmemiştir. Çalışmadan elde edilen bir başka sonuç ise, kuru saklama koşullarında saklanan betonların nemli ortamda saklanan betonlara göre daha düşük mukavemetler vermesidir [14].

Mehta ve Gjörv, yaptıkları çalışmada %30 oranında F sınıfı uçucu kül içeren çimentolarla ürettiği betonlarda ilk 7. ve 28. gündeki dayanımlarının düşük, 90. gündeki dayanımlarının ise ancak kontrol betonuna eriştiğini gözlemlemiştir [21].

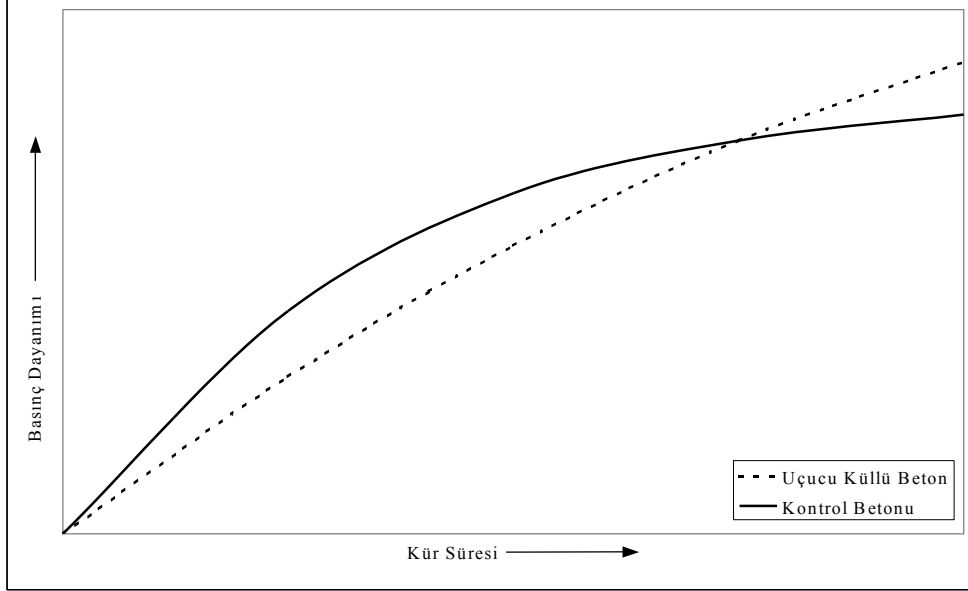
Yüksek miktarda uçucu kül (%40-%75) katkılı beton üreten, Haque, Langan ve Ward, elde edilen sonuçlar ışığında bağlayıcı madde miktarı  $325-400 \text{ kg/m}^3$  arasında değişen betonların yüzey uygulamaları için yeterli mukavemet, durabilite ve hacim sabitliğine sahip olduğunu belirtmiş, ancak daha fazla çalışma yapılmasını öngörmüşlerdir [22].

Gopalan ve Haque, buhar kürü uygulamış oldukları F sınıfı uçucu küllü betonlarda, 7 günlük buhar kürüyle üretilmiş betonlar bile 91 günlük hava koşullarında saklanmış betonlardan daha iyi basınç dayanımı vermiştir. Yazarların öngörüsüne göre, buhar kürüyle saklama koşullarında, uçucu kül oranı fazla olan numunelerin uçucu kül oranı az olan numunelere göre basınç dayanımı kazanımı, hava ortamında saklama koşullarına göre daha az olmaktadır [23].

Crow ve Dunstan, uçucu küllerin inceliğini değerlendirerek, inceliği fazla olan uçucu küllerin çimentoyla daha iyi reaksiyona girdiğini ve daha iyi mukavemet kazandığını söylemişlerdir [3].

C sınıfı ve F sınıfı uçucu küller karşılaştırıldığında, C sınıfı uçucu küllerin daha erken dayanım kazandığı, son dayanımlarının daha yüksek olduğu ve CaO miktarının yüksek oluşu, dolayısıyla inceliğin, çimento ile reaksiyona girme açısından daha büyük önem kazandığı söylenebilir [3,15,19]. Olek ve Diamond'ın çalışmalarında, uçucu kül eklenme miktarının %15'ten %25'e arttırılması ile C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla daha fazla mukavemet verdiği görülmüştür [15].

Genel olarak, uçucu küllerin ilk dayanımlarının kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlardaki dayanımlarının yüksek olduğu kabul edilerek Şekil 1.3'te olduğu gibi bir basınç dayanımı-zaman grafiği çizilebilir [3].



Şekil 1.3 Uçucu küllü ve kontrol betonları için basınç dayanımı-zaman grafiği

#### 1.3.3.2 Elastisite Modülü

Uçucu küllerin betonun elastisite modülüne etkisi az miktarda olmaktadır. Bazı çalışmalarda, hiçbir etkisi olmadığı bile söylenmektedir. Ancak, genel düşünce, uçucu küllerin erken yaşlarda beton elastisite modülünü düşürdüğü, ileriki yaşlarda ise arttırdığı yönündedir. Uçucu küllü üretilen betonların elastisite modülünün, kontrol betonuna oranla çok az bir oranda da olsa daha büyük olduğu kabul edilmektedir [3].

Giaccio, Violini, Zapitelli ve Zerbino, farklı çimento türleri ile yaptıkları çalışmalarda, ilk elastisite modülü düşük olan uçucu küllü betonların ileriki yaşlardaki elastisite modüllerinin kontrol betonuna oranla daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Ancak bu artış çok az oranlarda olmuştur [20].

Elastisite modülü, pratik anlamda uçucu küllerin kullanımı açısından basınç dayanımı kadar belirgin özelliklere sahip değildir. Elastisite modülü, agrega ve çimentonun belirlediği bir özellik olarak göze çarpmaktadır.

### 1.3.3.3 Sünme ve Rötreye

Betondaki rötreye olayı çimento hamurunun jel yapısından kaynaklanmaktadır. Katı taneciklerin adsorpladığı su molekülleri, bu tanecikleri elektrostatik kuvvetlerle birarada tutarlar. Adsorbe su tabakası, suyunu kaybedince incelmekte ve taneler birbirine yaklaşarak hacim büzülmeaktadır. Bir dış yüklemenin oluşması halinde ise, jel suyunun hareketi, daha da artacağından büzülme daha fazla olacaktır. Bu durum ise, sünme olarak adlandırılır. Rötreye neden olan başlıca faktör,  $C_2S$  hidrate ögelerinin jelleridir. Buradan anlaşıldığı gibi çimentonun varlığı rötrenin ana sebebidir. Ortam ısı, nem, agreganın elastisite modülü ve miktarı rötrede etkindir. Bunlara ek olarak, sünme için, betonun basınç dayanımı, yükleme hızı ve miktarı etken faktörlerdir [1].

Uçucu küllerin beton karışımına eklenme oranlarının sünme ve rötreyi etkilediği görülmüştür. %15-%20 oranlarında kullanılan uçucu küller, sünmenin ve rötrenin belirlenmesinde optimum değerler olarak belirlenmiş, genel olarak uçucu küllerin sünme ve rötreyi azalttığı söylenmiştir [3].

Atış'ın F sınıfı yüksek miktarda uçucu kül içeren betonlarda yaptığı çalışmalar, uçucu kül kullanımının rötreyi azalttığını göstermektedir [17].

Brooks ve Farrugia, %30 ve %70 oranlarında yerdeğiştirmeli olarak kullandıkları uçucu küllü ürettikleri betonda, sünmenin uçucu kül miktarının artışı ile arttığını ve yükleme yaşı arttıkça azaldığını söylemektedirler [24].

Gifford ve Ward, yaptıkları araştırmalarda uçucu küllerin sünmeyi azalttığını, bunun sebebinin ise uçucu küllerin elastisite modülünü arttırması ve toplam agrega miktarını arttırırken sünme için uygun hamur hacmini azaltması olduğunu söylemişlerdir [3].

### 1.3.4 Uçucu Küllerin Ortam Şartlarına Dayanıklılık Özellikleri

Dış ortam, sertleşmiş betonu fiziksel ve kimyasal yönden hasara uğratmaktadır. Tüm durabilite problemlerinde ilk çare boşluk oranı düşük dolu bir beton üretebilmektir. Dolu bir beton mekanik yönden yüksek mukavemetli olmasının yanında, aynı zaman da geçirimsizdir [1]. Uçucu kül kullanılarak su ihtiyacının azaltıldığı ve kohezyonlu bir beton üretildiği düşünülürse, uçucu küllerin dış ortama dayanıklı, geçirimsizliği az ve dolu bir beton üretiminde faydalı olacağı söylenebilir.

#### 1.3.4.1 Geçirimsizlik

Sertleşmiş beton içerisinde sürekli ağ biçimindeki kılcal boşluk sistemi akışkan geçirimsizliğinin başlıca sebebidir. Mineral katkıları, genellikle boşluk yapısını iyileştirerek geçirimsizliği azaltmakta ve dayanıklılığı arttırmaktadır [7].

Sarıçimen, Maslehuddin, Al-Tayyib ve Al-Mana, F sınıfı uçucu küllerle basit ikame metodu kullanarak ürettikleri betonlarda, uçucu kül kullanımının su ve kloro karşı geçirimsizliği azalttığını görmüşlerdir. İlk 7 günlük geçirimsizlik değerleri, farklı kür koşullarında uçucu küllerin kullanımıyla azalmaktadır. Uçucu küllerin bu özelliği, çimentonun hidratasyon sırasında serbest bıraktığı kirecin uçucu küller tarafından kullanılarak daha yoğun bir beton üretilmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [25].

Zang, Bilodeau, Malhotra ve Kim, F ve C sınıfı uçucu küller kullanarak ürettikleri betonlarda  $Cl^-$  geçirimsizliğini incelemişler ve her iki sınıf uçucu külün  $Cl^-$  geçirimsizliğini azalttığını görmüşlerdir. Yazarlar, C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla geçirimsizliği daha da azalttığını söylemişlerdir. F sınıfı uçucu küllerle üretilen betonların kür koşullarından etkilendiği belirtilmektedir [26]. Davis'in ilk yaptığı çalışmalar da göstermektedir ki uçucu küller geçirimsizliği azaltmaktaysa da 28. gündeki geçirimsizlikleri yüksektir [3].

#### 1.3.4.2 Zararlı Kimyasallara Dayanıklılık

Betonun zararlı kimyasallara dayanıklılığı, çimentonun varlığıyla ilgilidir. Portland çimentosu, açığa çıkardığı  $Ca(OH)_2$  nedeniyle kuvvetli bir bazdır ve tüm asitlerden zarar görür. Beton, sülfatlı sulara da dayanıklı değildir. Candlot tuzu oluşturarak hasar meydana getirirler.  $Mg^{++}$ ,  $Mn^{++}$  ve  $NH_4^+$  gibi iyonlar yerdeğiştirme özellikleri nedeniyle betona zarar veren bir diğer faktördür [1]. Uçucu küllerin, serbest kirecin kullanımını sağladığı ve geçirimsizliği arttırdığı için zararlı kimyasallara dayanıklılığı da arttırdığı söylenebilir.

Mangat ve Khatib, %22 ve %32 oranlarında basit ikame metoduyla ürettikleri F sınıfı uçucu küllü betonlarda sülfata karşı direncin arttığını gözlemlemişlerdir. %55 nemli ve 20°C sıcaklığa sahip kür koşullarında saklanan betonlarda uçucu küller yine sülfata karşı dayanıklılığı arttırmışlardır [27].

Tikalsky ve Carrasquillo, yirmi farklı uçucu külü %25, %35 ve %45 oranlarında basit ikame metoduyla beton içerisinde kullanarak sülfata karşı dayanıklılığı incelemişlerdir. Yazarlar, yüksek kireçli uçucu kül kullanımının sülfata karşı dayanıklılığı azalttığını gözlemlerken, düşük kireçli uçucu kül kullanımının sülfata karşı dayanıklılığı arttırdığını belirlemişlerdir [28].

Fidjestol, uçucu küllerle ürettiği betonlarda organik asitlere karşı dayanıklılığı incelemiş ve uçucu küllerin betondaki asitlere karşı dayanıklılığı arttırdığını tespit etmiştir [29].

Yapılan deneysel çalışmalar göstermiştir ki, F sınıfı uçucu küller betonun zararlı kimyasallara karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. C sınıfı uçucu küller ise içermiş oldukları yüksek kireç yüzünden zararlı kimyasallara dayanıklılığı azaltmaktadır [3].

#### **1.3.4.3 Alkali-Agrega Reaksiyonu**

Çimentoların hammaddeleri içerisinde  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  gibi alkali oksitler bulunabilmektedir. Agregaların içerisinde aktif silis bulunması durumunda bu alkali oksitler, sodyum, potasyum ve kalsiyum silikatı olan bir silikat jeline dönüşür, genişleyerek ve şişerek beton içerisinde ağ şeklinde sık çatlaklar meydana getirirler [1].

Kabayaski, Hozumi, Nakano ve Yanagida, F sınıfı uçucu külleri %10, %20 ve %30 oranlarında kullanarak basit ikame yoluyla ürettikleri betonlarda, uçucu kül oranı arttıkça alkali-agrega reaksiyonun kontrol altına alındığını söylemişlerdir. Alkali miktarı yüksek olan çimentolarda %20 oranında uçucu kül kullanımının, alkali miktarı %0,8'e kadar olan çimentolarda ise %10 oranında uçucu kül kullanımının alkali-agrega reaksiyonunu önlemekte yeterli olduğunu belirtmektedirler [30].

Lee, C sınıfı uçucu kül, düşük ve yüksek alkalili çimentolarla ürettiği betonlarda alkali-agrega reaksiyonunun arttığını söylemektedir [31]. Dunstan'ın yapmış olduğu çalışmalarda da C sınıfı uçucu kül kullanımı ile alkali-agrega reaksiyonunun arttığı görülmekte olup, buna sebebin uçucu kül içerisindeki  $\text{CaO}$  miktarının artması ile alkali-agrega reaksiyonunun artışı arasındaki bağıntıdan kaynaklandığı belirtilmektedir. Ancak yüksek miktarda C sınıfı uçucu kül kullanımı agreg-a-alkali reaksiyonunu azaltmaktadır [3].

#### **1.3.4.4 Donma Çözölme Dayanıklılığı**

Betonu meydana getiren çimento hamuru ve agrega bileşenlerinin özellikleri ve miktarları ile betonun donmaya dayanıklılığı arasındaki ilişkiler henüz kesin olarak saptanamadığı için betonun donmaya dayanıklılığı  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $+20^{\circ}\text{C}$  arasında donma çözölme deneyleri yapılarak araştırılır. Kılcal boşlukları engellemek için hava sürükleyici kullanmak, betonun donmaya karşı dayanıklılığını arttırmada en çok kullanılan yöntemdir [1].

Haque, Day ve Langan yaptıkları çalışmalarda uçucu küllerin hava sürükleyici ihtiyacını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bu veriden yola çıkarak uçucu küllerin daha az hava oluşmasına neden olarak donmaya karşı dayanıklılığı azalttığı söylenebilir [14].

Donma çözölme dayanımının belirlenmesi için yapılan çalışmalarda C ve F sınıfı uçucu küllerin genelde dayanımı azalttığı görülmüştür. Virtanen'in yaptığı çalışmalar, uçucu küllerin yüksek oranda kullanımının donma çözölme direncini azalttığını ancak hava sürükleyici katkı kullanılarak yapılan çalışmalarda hava miktarı sabit tutulacak şekilde katkı miktarı artırılırsa, uçucu küllerin olumsuz etkisinin ortadan kalkacağı görülmektedir [3].

#### **1.3.4.5 Deniz Ortamına Dayanıklılık**

Betonların deniz ortamına dayanıklılığı geçirimsizliğine bağlıdır. Beton içerisine kılcal boşluklardan giren deniz suyu, donatının korozyonuna ve kimyasal hasara neden olmaktadır. Uçucu küllerin geçirimsizliği azaltması nedeniyle deniz ortamına dayanıklılığı da arttıracak düşünülebilir. Ancak, donma çözölme, sülfata karşı dayanıklılık, alkali-agrega reaksiyonu, korozyon, magnezyum tuzlarına karşı dayanıklılık, deniz ortamına dayanıklılığı belirleyen diğer faktörlerdir. Uçucu küllü betonların sayılmış olan faktörlere genelde olumlu etkisi olduğu düşünülürse, deniz ortamına dayanıklılığının da iyi olacağını gösterebilir [3].

Onabolu, F sınıfı uçucu külleri %30 oranında kullanarak basit ikame metodu ile ürettiği betonları deniz ortamında saklamış ve kontrol betonuna göre basınç dayanımlarının ileriki yaşlarda arttığını ve geçirimsizliğin arttığını görmüştür. Yazar, bu verilerden yola çıkarak uçucu kül kullanımının deniz ortamına dayanıklılığı arttırdığını belirtmektedir [32].

#### 1.3.4.6 Donatı Korozyonu

Korozyon, elektrokimyasal bir olay olup, ortamın elektrolitliğinin artması halinde artmaktadır. Asit karakterli  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  gibi iyonlar bu hususta önemlidir.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Cl}^-$  iyonlarının difüzyonunu önler ve nötürleşmeyi sağlar. Ancak yaşlı betonlarda,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , karbonatlaşır ve nötürleşme yeteneğini kaybeder. Karbonatlaşmanın ana sebebi, priz ve sertleşme aşamasında ortamda mevcut olan  $\text{CO}_2$  gazının beton bünyesine difüzyon yapmaları ve iç yapıda karbo-alüminatlar oluşturmalarıdır. Karbonatlaşma rötresi olarak adlandırılan bu olay sırasında bir büzülme meydana gelmektedir [1]. Geçirimsizliği az olan bir beton üretimi, bu nedenle donatı korozyonunun engellenmesinde önemlidir.

Malhotra, Zhang ve Leaman, F sınıfı uçucu küller kullanarak farklı su/çimento oranlarıyla ürettikleri betonlarda yaptıkları çalışmalarda, 8 yıllık süreç içerisinde yalnızca su/çimento oranı yüksek olan betonlarda korozyona rastlamışlardır. Klor geçirimsizliği ile ilgili olarak yaptıkları çalışmalarda ise uçucu kül kullanımının klor geçirimsizliğini azalttığını görmüşlerdir [33].

Kokubu ve Nagataki, karbonatlaşmanın korozyon üzerindeki etkisini uçucu küllü betonlarda incelemişlerdir. %15 ve %30 oranlarında uçucu kül kullanarak ürettikleri betonlarda 20 yıllık kür sonucunda karbonatlaşma derinliğinin artışıyla korozyonun arttığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül kullanılan betonlarda kontrol betonuna göre karbonatlaşma derinliğinin azalmakta olduğu görülmüştür. Su/çimento oranının artışı ile donatı korozyonunun arttığını belirten yazarlar, uçucu kül kullanımının artışı ile korozyon yüzdesinin azaldığını söylemektedirler. 20 yıllık beton numunelerden uçucu kül oranı %30 olanlarda, su/çimento oranı 0,65'in üzerindekilerde korozyon varlığına rastlanmışken, kontrol numunelerinde, su/çimento oranı 0,45 olanlarda dahi korozyona rastlanmıştır. Numuneler, deniz suyu içerisindeki kür koşullarında da saklanmış ve uçucu kül içeren betonların basınç dayanımları 20 yıl sonunda kontrol betonundan daha iyi sonuç vermiştir [34].

#### 1.4 Uçucu Küllü Betonlarda Karışım Oranlama Metodu

Uçucu küllerin kullanım miktarları, amaçlanan kullanım nedenlerine göre değişmektedir. Başlıca uçucu kül kullanım sebepleri şöyledir [3];

- Çimento miktarının azaltılarak maliyetin düşürülmesi
- Hidratasyon ısısının düşürülmesi
- İşlenebilirliğin artırılması
- 90 günlük ve üzerindeki mukavemet değerlerinin artırılması

Beton içerisinde kullanılan uçucu küller, beton özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir. Beton özelliklerinin olumsuz yönde değişmesini engellemek için uçucu küllerin karışım oranlarının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Ancak ülkemizde uçucu küller, istenilen özellikleri sağladıklarına bakılmaksızın, genelde rastgele kullanılmaktadır. Aynı zamanda kullanılan uçucu küllerin sahip olduğu kimyasal ve mineralojik özelliklerin iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla Şubat 2001 tarihli TS 11222 Hazır Beton Standardı, beton üretiminde kullanılacak uçucu küllerin TS EN 450 standardına uygun olmasını istemekte ve kullanım miktarlarını sınırlamaktadır. Uçucu küller, beton içerisinde başlıca iki şekilde kullanılmaktadır [3,35];

- Portland çimentosu yerine uçucu küllü çimento kullanımı
- Uçucu külün beton içerisinde katkı olarak kullanılması

Çimento içerisinde uçucu kül kullanımı, diğer kullanıma göre daha kontrollüdür. Uçucu kül ve çimento oranları böylece önceden belirlenmekte ve karışım oranları sınırlandırılmaktadır. İlave bir bileşen olarak uçucu külün kullanımı ise çok daha esnek kullanım sahası yaratmaktadır. Bu şekilde uçucu kül özellikleri, beton içerisinde daha etkin şekilde görülmektedir. Ancak bu şekilde uçucu kül özelliklerinin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir [3,35].

Uçucu küller, beton içerisinde birden fazla rol oynamaktadır. Taze betonda ince agrega gibi davranıp bazı durumlarda su ihtiyacını azaltabildiği gibi, sertleşmiş betonda puzolanik yapısından dolayı bağlayıcı özellik göstermekte, mukavemeti ve durabiliteyi arttırabilmektedir. Uçucu küllerin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisinin incelenmesinde yalnızca portland çimentosuyla üretilmiş betonlar referans alınmaktadır. Buna göre iki kabul yapılmaktadır [3];

- Uçucu küller beton mukavemetini erken yaşlarda azaltırlar.
- Eşit işlenebilirliğin sağlanmasında, uçucu küllerle üretilen betonların su ihtiyacı, yalnızca portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha azdır.

Uçucu küllerin beton içerisinde ilave olarak kullanımı için, yıllar içerisinde farklı karışım oranları geliştirilmiştir. Başlıca üç karışım oranlama metodu şöyledir [3,35];

- Basit ikame metodu; çimentonun yerine kısmi olarak uçucu kül kullanılmasıdır.
- İlave metodu; uçucu külün ince agrega olarak kullanılmasıdır.
- Kısmi ikame metodu; uçucu külün kısmi olarak çimento ve ince agrega yerine kullanılmasıdır.

#### **1.4.1 Çimentonun Yerine Kısmi Olarak Uçucu Kül Kullanılması**

##### **(Basit İkame Metodu)**

Bu metotta, belli bir miktar çimento, karışımından çıkarılmakta ve yerine aynı miktarda uçucu kül koyulmaktadır. Çıkarılan çimento yerine eklenen uçucu küller, başlangıçta az bağlayıcılık gösterdiği için ince agrega gibi davranmaktadır. Bu nedenle karışımın işlenebilirliği artmaktadır. Bu şekilde üretilen betonların ilk dayanımları düşmektedir. Ancak ileri yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları artmakta, bazen de yalnız portland çimentosuyla üretilen betonların dayanımlarından daha yüksek değerler alabilmektedirler [3].

Basit ikame metodunun kullanılmasındaki başlıca sebep, kütle beton üretiminde hidrasyon ısını düşürmek ve işlenebilirliği arttırmaktır. Kullanılan uçucu külün yüksek veya düşük kireçli olması kullanım sırasında farklılıklar gösterebilmektedir [3].

#### **1.4.2 Uçucu Külün İnce Agrega Olarak Kullanılması**

##### **(İlave Metodu)**

İlave metodunda, karışımdaki çimento miktarı değiştirilmeksizin, karışıma uçucu kül eklenmektedir. Uçucu külün eklenmesi, karışımdaki bağlayıcı madde miktarını arttırmaktadır. Bu şekilde, betonun su ihtiyacı ve kohezyonluğu artmaktadır. Betonun kullanım şekline bağlı olarak karışımda diğer düzenlemeler yapılmaktadır. Bu yaklaşım, sülfata dayanıklılığı sağlamak için minimum çimento faktörü ile ince agrega yerine puzolan kullanımını arttırmak amacıyla ilk kez Güney Saskatchewan nehrinde Price tarafından kullanılmıştır. Betonun ileriki yaşlardaki mukavemeti artmaktadır [3].

### **1.4.3 Uçucu Külün Kısmi Olarak Çimento ve İnce Agrega Yerine Konulması (Kısmi İkame Metodu)**

Kısmi ikame metodunda karışımdan çıkarılan çimento yerine farklı miktarda uçucu kül konulmakta, ince agregası ve su miktarında değişiklik yapılarak ayarlanmaktadır. Bu çalışmanın başlıca amacı, uçucu kül kullanımı ile gelen en önemli dezavantaj olan erken yaşlardaki mukavemet kaybının önüne geçmektir. Ancak bu oranlama yapılırken uçucu küllerin maliyeti azaltma ve işlenebilirliği artırma gibi avantajlarının da düşünülmesi gerekmektedir. Bütün etkenler göz önüne alınarak optimum performansa ait karışım oranları belirlenmektedir [3].

Kısmi ikame metodu genel olarak modifiye edilmiş ikame metodu olarak bilinmekle beraber son yapılan çalışmalar ile rasyonel oranlama metodu olarak ikinci bir oranlama metodu anılmaktadır.

#### **1.4.3.1 Modifiye Edilmiş İkame Metodu**

Uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonuyla karşılaştırılabileceğini söyleyen, Lovewell ve Washa, 1958 yılında bu metodu ilk kullananlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, erken yaşlarda (3. ve 28. günler arasında) elde edilen basınç dayanımlarının uçucu küllü ve uçucu külsüz betonlarda eşit olması için uçucu küllü betondaki toplam bağlayıcı maddenin kontrol betonundaki çimento miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir. Ancak, 1960'lı yıllarda yapılan çalışmalar, uçucu küllü betonlarda işlenebilirlik ve uçucu kül özelliklerinin de karışım oranlama metodunda göze alınması gereken faktörler olduğunu göstermiştir. Bu anlayışın ortaya çıkmasında Abrams'ın su/çimento ile dayanım arasındaki ilişkinin belirlenmesinde kullanılan karışım oranlama metodları büyük rol oynamıştır [3].

#### **1.4.3.2 Rasyonel Oranlama Metodu**

Bu metod ilk kez Smith tarafından kullanılmıştır. Modifiye ikame metodundan farkı, uçucu kül için bir  $k$  faktörünün tanımlanmış ve kullanılıyor olmasıdır. Smith,  $f$  uçucu kül ağırlığının çimentodan çıkarılan bir  $k \cdot f$  çimento ağırlığına eşit olabileceğini söylemiştir [3]. Smith'in çalışması ile ilgili bazı bilgiler ve sonuçlar şöyledir [36];

- Uçucu kül kullanılmayan betonlarda dayanımı etkileyen iki ana faktör, çimento tipi ve su/çimento oranıdır. Farklı sertleşme oranlarına sahip betonlarda su/çimento

oranında ayarlama yapılarak aynı basınç dayanımına ulaşmak mümkündür. Abrams'ın basınç dayanımı ve su/çimento arasındaki ilişkiyi inceleyen eğrisi yardımı ile farklı betonlarda aynı basınç dayanımını elde etmek için su/çimento oranları seçilebilmektedir.

- Abrams'ın basınç dayanımı su/çimento eğrisi yardımı ile uçucu küllü ve kontrol betonları arasında da ilişki kurarak aynı basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür.
- Uçucu kül kullanımında üç belirsizlik vardır. Uçucu küllerin çimento içerisinde, katkı olarak ve ince agrega olarak kullanımı esasen aynı mantık içerisinde olmaktadır. Çimento içerisinde %25 oranında ya da katkı olarak %20 çimento yerine uçucu kül kullanımı aynı oranlamayı göstermektedir ( $20/80=0,25$  veya  $25/100=0,25$ ). Uçucu külün kullanımı ile işlenebilirliğin azaldığı gözlenirse agrega/çimento oranında azaldığı görülür. Bunun anlamı ise uçucu külün agrega miktarını azaltarak ince agrega yerine kullanıldığıdır. Görüleceği üzere üç yaklaşımda da düşünce tarzı hatalıdır. Uçucu küllü betonlar yeni bir beton olarak ele alınmalı ve incelenmelidir.
- Rasyonel metodun kullanılmasından önce uçucu küllerin basınç dayanımına etkisi incelenmelidir. Uçucu küllü ve kontrol betonlarının basınç dayanımı su/çimento oranı grafikleri incelenerek, uçucu küllü betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımını elde etmesi için gerekli su/çimento oranı bulunur.
- k külün bağlayıcılık etkisi, K uçucu külün ağırlığı olmak üzere  $k \cdot K$  çıkarılan çimentonun ağırlığı, S su miktarı, C çimento miktarı ise, uçucu küllerin kontrol betonuna eşit dayanıma sahip olabilmesi için etkin su/çimento oranı;

$$\left( \frac{S}{C} \right)_s = \frac{S}{C + kK} = \frac{S}{C} \left[ \frac{1}{1 + \left( \frac{kK}{C} \right)} \right] \quad (1.3)$$

- k etkinlik faktörünün belirlenmesinde (1.3) denklemini kullanan Smith, farklı basınç dayanımları için etkin su/çimento oranlarını bularak k etkinlik katsayılarını bulmuş ve bulduğu k katsayılarının ortalamasını alarak uçucu külün k etkinliğini belirlemiştir. Elde ettikleri k değerlerini yorumlayarak etkinlik faktörünün 7., 28. ve 90. günler arasında çok fazla değişim göstermediğini söylemiştir.
- Smith, bağlayıcı etkinlik metodu kullanarak üretilen uçucu küllü betonların kontrol betonuna eşit dayanıma sahip olması halinde, işlenebilirliklerin her iki

betonda yaklaşık olarak eşit olduğunu, ancak uçucu küllerin beton kohezyonunu arttırdığını söylemiştir.

- Smith, önermiş olduğu metodda uçucu kül ile üretilen betonlarda basınç dayanımının ve işlenebilirliğin sabit kalmasını sağlamaya çalışmıştır. Smith'e göre uçucu küllü betonların basınç dayanımları, uçucu kül, çimento ve suyun birbirlerine rölatif oranlarına bağlıdır.
- Bağlayıcı etkinlik metodu, puzolanların ve katkı maddelerinin beton içerisinde kullanımında da kullanışlı olmaktadır.
- Diğer karışım oranlama metodları, su ve agrega oranlarından bağımsız yalnızca çıkarılan çimento ve eklenen uçucu kül miktarlarından ibaret olmaktadır.
- Uçucu küller, segregasyona sebebiyet verebilen düşük mukavemetli betonlarda kohezyonu sağlamak ve maliyeti düşürmek olmak üzere iki ana sebeple kullanılmaktadır.

1975 yılında, Ghosh, Abrams'ın "iyice sıkıştırılmış betonların mukavemetleri su/çimento oranı ile ters orantılıdır" fikrinden yola çıkarak, su/çimento oranındaki çimentonun içerisine uçucu külü de ekleyerek uçucu küllü ve kontrol betonları arasında bir ilişki kurmuştur. R, kontrol betonunun su/çimento oranı, M ve N sabitler olmak üzere, R', uçucu küllü betonun su/çimento oranı şöyledir;

$$R' = M + N R \quad (1.4)$$

Ghosh, laboratuarda elde ettiği sonuçlar vasıtasıyla M ve N için sonuçlar elde ederek, buna göre grafikler oluşturmuştur. Bu sonuçlar eşliğinde karışım oranlamasının yapılabileceğini öngörmüştür [3].

Munday ve arkadaşları 28. gündeki amaç mukavemetinin uçucu küllü betonlar ile elde edilmesi için yaptıkları çalışmada karışım oranlaması için bir prosedür önermişlerdir. Buna göre karışım oranlamasının yapılması için bazı verilerin belirlenmesi gerekmektedir. Bu verileri şöyle belirtmişlerdir;

- Su/çimento oranının belirlenmesi
- Serbest su miktarının seçilmesi
- Uçucu kül/çimento oranının belirlenmesi
- Çimento ve uçucu kül miktarının belirlenmesi
- Toplam agrega miktarının belirlenmesi

- Deneme karışımları yapılarak, sınaama yapılmaması

Altı farklı uçucu külle yaptıkları araştırmalar sonucunda uçucu küllü betonlarla, kontrol betonunun 28. gündeeki mukavemetine erişmişler, sonraki yaşlarda ise uçucu küllü betonların mukavemetlerinin kontrol betonundan daha yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Bütün uçucu küllü numunelerde 28. gündeeki mukavemete erişmek için eklenen uçucu kül miktarlarının çıkarılan çimentodan daha fazla olduğunu ve bu miktarın uçucu külün cinsi ile değiştiğini gözlemlemişlerdir. Uçucu küllerin inceliği arttıkça çıkarılan çimento miktarının arttığını söylemişlerdir [3].

### 1.5 k Etkinlik Faktörü ve Bu Konuda Yapılmış Çalışmalar

İlk defa Smith tarafından öne sürülen k etkinlik faktörü bugüne kadar birçok araştırmada incelenmiş ancak bu konuda tam olarak bir fikir birliğine varılamamıştır. Yapılmış olan bu araştırma tezinin ana konusu k etkinlik faktörünün bağılı olduğu etkenleri belirlemek ve hesaplanması için bir yöntem geliştirmektir.

Munday ve arkadaşları, Britanya’da yaptıkları çalışmada k etkinlik faktörünün kullanımının pratikte zayıf yönleri olduğunu öne sürmüşlerdir. Bunun nedenlerini şöyle özetlemişlerdir [3];

- k etkinlik faktörü sabit değildir. Kullanılan çimento, kür koşullarına ve amaç dayanımı elde etmek için yapılan beton karışım oranlarına göre değişmektedir.
- İstenilen işlenebilirliği sağlamak için, çimento ve uçucu külün su ihtiyacı arasındaki fark ve farklı uçucu küllerin su ihtiyacı arasındaki fark nedeniyle, agrega içeriğinde ayarlama yapılması gerekmektedir. Bu da yöntemi pratikte kullanışsız kılmaktadır.
- Her türlü kullanım için metod karışık ve kullanışsızdır.

Cannon, 1968 yılında yaptığı çalışmalarda Abrams’ın su/çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi kullanarak 28. ve 90. günlerdeki uçucu küllü betonların basınç dayanımlarını kontrol betonuyla eşitlemeye çalışmıştır. Bu şekilde ürettiği etkinlik faktörlerinin maliyet açısından uçucu kül ve çimento miktarlarına etkisini incelemiş ve bu veriler ışığında karışım oranlama grafikleri ve tabloları üretmiştir. Lovewell ve Washa, Cannon’un yaptığı araştırmaları değerlendirerek uçucu küllü

betonlardaki bağlayıcı miktarının kontrol betonlarındaki bağlayıcı miktarından fazla olması gerektiğini söylemişlerdir [3].

Harrison, yaptığı çalışmada uçucu kül ve çimento miktarlarının belirlenmesi için üç faktör üzerinde durulması gerektiğini söylemiştir [39];

- Minimum  $(C + k*K)$  miktarı  
C = Çimento miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )  
K = Uçucu kül miktarı ( $\text{kg/m}^3$ )  
k = Avrupa şartnamesi EN 206'ya göre dizayn edilmiş etkinlik faktörü
- Maksimum  $S / (C + k*K)$  oranı
- İstenilen beton dayanımını elde etmek için gerekli olan su/bağlayıcı oranı (R)

Tip 1 çimentosu ile yapılan çalışmada kullanılan uçucu kül için k değerinin 0,3 ile 0,5 aralığında olduğu belirtilmiştir. Uçucu kül için k değeri çimento içinde kullanıldığında 1 olmaktadır. Buna göre uçucu külün dayanıma gerçek katkısının eşitlikte yer alması gerekir. Su/etkin bağlayıcı oranı aşağıdaki denklemdeki gibidir [39];

$$R = S / (C + kg*K) \quad (1.5)$$

Tip 1 42,5 çimento ve %30 uçucu kül kullanılarak üretilen betonda, k değerinin 0,2 ile 0,45 arasında olduğu bulunmuştur. Uçucu kül kullanımı arttıkça k değeri düşmekte, uçucu kül kullanımı azaldıkça k değeri yükselmektedir [39].

Akman ve Yücel, etkinlik faktörünü, uçucu külün bağlayıcılığının çimentonun bağlayıcılığına oranı olarak tanımlamışlar, belirlenmesinde Bolomey formülünü kullanmışlardır [37].

$$f_c = K_B \left[ \frac{C}{S + h} - k' \right] \quad (1.6)$$

Yazarlar, Bolomey formülünün kullanımı sırasında ilk önce yalnız portland çimentosu kullanarak kontrol betonu üretmişlerdir. Elde edilen basınç dayanımı vasıtasıyla  $k'$  ve  $K_B$  katsayıları bulunmuştur. Uçucu küllü beton üretiminde ise bu katsayılar kullanılmaktadır. C çimento miktarı yerine bağlayıcı madde miktarını ifade etmek üzere  $C'(k*K)$  değeri kullanılır. Böylece uçucu kül üretiminde Bolomey formülü şöyle olmaktadır [37,38];

$$f_c = K_B \left[ \frac{C' + (kK)}{S + h} - k' \right] \quad (1.7)$$

Uçucu küllü beton üretildikten sonra, bilinmeyen tek değer olan k faktörü yerine konularak bulunmaktadır. Bu araştırmanın eleştirilebilir yönü uçucu kül içeren ve içermeyen betonlarda aynı  $K_B$  Bolomey katsayısının kullanılmasıdır. Yazarlar, C sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının siliko ve sülfokalsik uçucu küllerde 0,14 ile 0,57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir [37].

Güler, F sınıfı Orhaneli uçucu küllerle Bolomey formülünü kullanarak yaptığı çalışmalarda, k etkinlik faktörünün 0,36 ile 0,17 arasında değiştiğini söylemiş, ancak k etkinlik faktörünün değişken olduğunu belirtmiştir [38].

Özcan, yapmış olduğu çalışmada %10, %20, %30 oranlarında çimentoyu çıkarıp yerine farklı miktarlarda C ve F sınıfı uçucu küller ekleyerek beton üretmiştir. Ürettiği betonlarda Bolomey formülünü kullanarak bulduğu k etkinlik faktörü, C ve F sınıfı uçucu küller için sırasıyla 0,79 ve 0,62'dir. Ancak, eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha az olduğu dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada gözlenen bir özellikte C sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılıklarının daha fazla olması ve erken yaşlardaki dayanımlarının daha iyi olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin de yüksek olmasıdır [39].

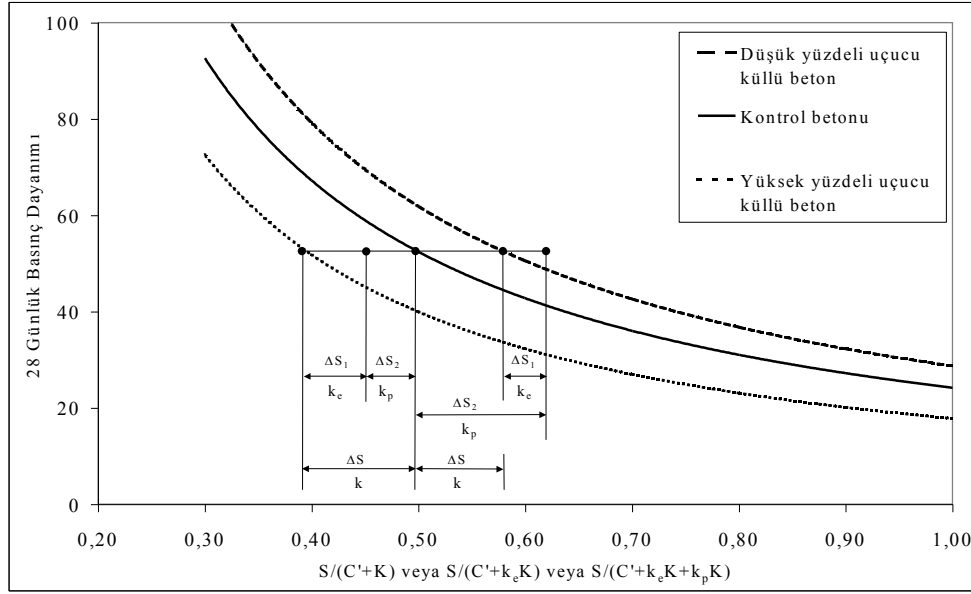
Babu ve Rao k etkinlik faktörünün belirlenmesinde, Smith'inde belirtmiş olduğu su/çimento oranının basınç dayanımı ile karşılaştırılmasından yararlanmıştır. Bunun için yalnız çimento ile üretilmiş beton ile uçucu küllü beton arasındaki su/ çimento farkını kullanmışlardır [40].

$$\Delta S = \frac{S}{C} - \frac{S}{C' + kK} = \frac{S}{C' + kK} - \frac{S}{C' + K} \quad (1.8)$$

$$\Delta S = \frac{S}{C'} \left[ \frac{1}{1 + k \frac{K}{C'}} - \frac{1}{1 + \frac{K}{C'}} \right] \quad (1.9.)$$

$\Delta S$  değerinin belirlenmesi için uçucu küllü ve kontrol betonunun su/çimento ve basınç dayanımı değerlerinin arasındaki ilişkiyi inceleyen grafiğin çıkarılması gerekmektedir. Şekil 1.4'de gösterilen grafikte  $\Delta S$  değeri  $\Delta S_1$  ve  $\Delta S_2$  olmak üzere

ikiye ayrılmaktadır. Uçucu küller için başlangıçta ortalama bir  $k$  faktörü bulunmaktadır.  $k$  faktörünün (1.8) formülünde yerleştirilmesi ile  $\Delta S_1$  değeri elde edilmekte ve uçucu küllü betonun  $\sigma - S/(C+kK)$  (basınç dayanımı - su/bağlayıcı madde) grafiği  $\Delta S_1$  farkı kadar yerdeğiştirmektedir. Yeni grafikte, farklı yüzdelere sahip uçucu küle sahip betonların her bir uçucu kül yüzdesi için kontrol betonu ile arasındaki su/bağlayıcı madde oranı farkı,  $\Delta S_2$  değerini oluşturmaktadır [40].

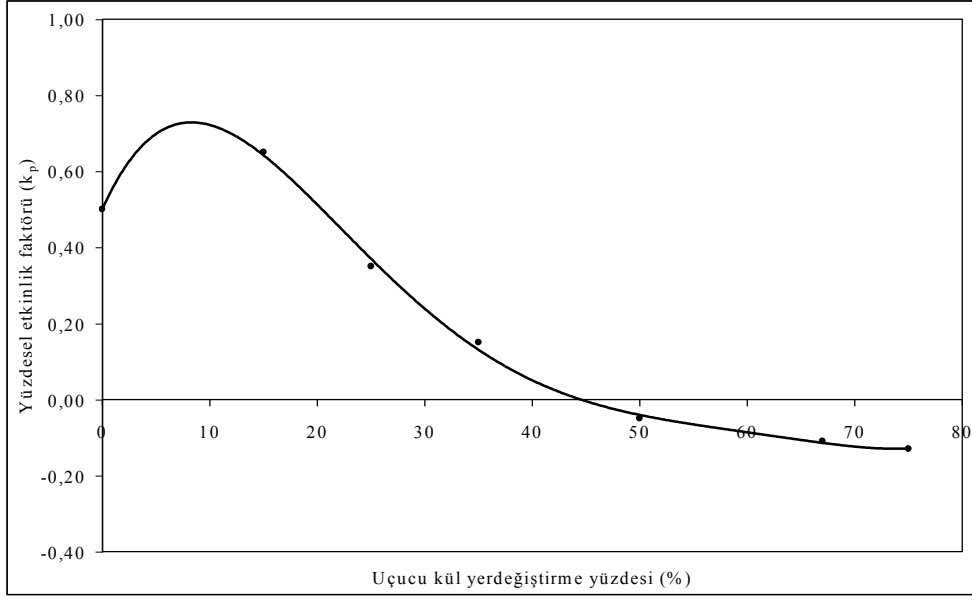


Şekil 1.4  $\Delta E$  değerinin belirlenmesi için basınç dayanımı - su/bağlayıcı madde oranı diagramı

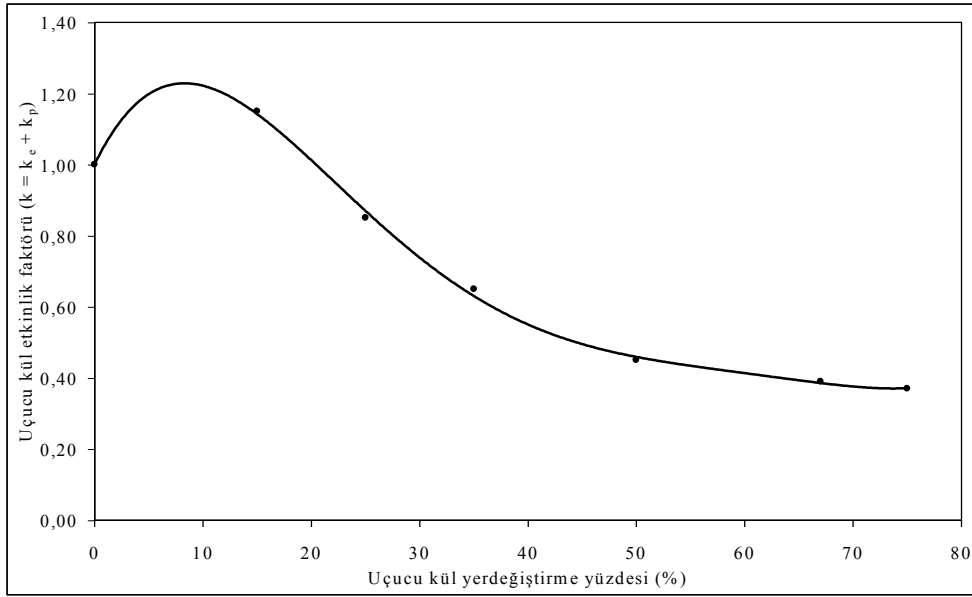
Yazarlar, farklı yüzdelere ve farklı uçucu külleri kullanarak elde ettikleri betonlarda  $k$  faktörünün 0,2 ile 0,8 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bu değerlerden yola çıkarak ortalama bir 0,5 değeri almışlar bunun adına genel etkinlik faktörü ( $k_e$ ) demişlerdir.  $k_e$  değerini (1.8) formülünde yerleştirilmesi ile  $\sigma - E/C$  grafiği üzerinde  $\Delta E_1$  düzeltmesi yapılmaktadır. Yeni grafik üzerindeki her uçucu kül yüzdesi için ayrı  $\Delta E_2$  düzeltmesi yapılmaktadır. Bu düzeltme için (1.8) formülünde  $k_e$  faktörüne bir  $k_p$  faktörü eklenmektedir. Yazarlar, bu ikinci  $k$  faktörünü yüzdesel etkinlik faktörü ( $k_p$ ) olarak tanımlamışlardır.  $k_e$  ve  $k_p$  faktörlerinin toplamı, her bir uçucu kül yüzdesi için bir  $k$  etkinlik faktörü oluşturmaktadır ( $k=k_e+k_p$ ) [40].

C ve F sınıfı uçucu külleri %75, %67, %50, %35, %25 ve %15 oranlarında beton içerisinde kullanmışlar ve bu sonuçlar ışığında her bir uçucu kül yüzdesi için  $k_p$  değerleri elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda  $k_p$  değerinin uçucu külün yerleştirme oranına göre değiştiğini gözlemlemişler ve bunu Şekil 1.5'te görünen

grafikle ifade etmişlerdir. Elde edilen  $k_p$  faktörünün diagramına  $k_e$  faktörü eklenerek Şekil 1.6’da görüldüğü gibi uçucu külün  $k$  etkinlik faktörü belirlenmektedir [40].



Şekil 1.5 Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi -  $k_p$  diagramı



Şekil 1.6 Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi - etkinlik faktörü ( $k=k_e+k_p$ ) diagramı

Şekil 1.6’dan görüleceği gibi  $k$  etkinlik faktörü, uçucu külün yerleştirme oranına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Yapılmış olan diğer çalışmalarda olduğu gibi uçucu küller için tek bir  $k$  etkinlik faktörü değeri belirlemek uygun olmamaktadır. Babu ve Rao’nun çalışmalarından elde ettikleri sonuçlar şöyledir [40];

- $k$  etkinlik faktörü için farklı yüzdelerde yerleştirme oranına göre tek bir değer alınamamaktadır.  $k_e$  faktörü içinse yapılan ön araştırmalar ve daha önceki araştırmacıların elde ettiği sonuçlar göz önüne alınarak 0,5 değeri alınmaktadır.
- Farklı yerleştirme oranları için farklı  $k_p$  değerleri bulunmalı ve bu değerler bütün yerleştirme oranları için aynı kabul edilen  $k_e$  değerine eklenerek uçucu külün  $k$  etkinlik faktörü belirlenmelidir.
- Maksimum  $k$  etkinlik değeri %10 ve %20 oranları arasında uçucu kül yerleştirilmesi ile elde edilmektedir. Bu oranlarda uçucu kül yerleştirildiğinde 28 günlük basınç dayanımları fazla değişmemektedir.
- Önceki araştırmacıların belirttiği gibi uçucu kül yerleştirilme oranı %40'a kadar,  $k$  etkinlik faktörü kullanılarak mukavemetin tahmin edilmesi tutucu değerlerle sonuçlanmaktadır.
- Farklı su/bağlayıcı madde oranlarında ve farklı uçucu kül yerleştirme yüzdelerinde, genel ve yüzdesel etkinlik faktörü kullanarak betonun basınç dayanımındaki değişimi belirlemek mümkündür.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, farklı etkinlik faktörü değerleri vermiştir. Smith, 20 farklı uçucu kül ile yaptığı deneylerde 28 günlük basınç dayanımları için 0,231 değerini elde etmiş ve 0,25 değerini optimum etkinlik faktörü için teklif etmiştir. Alman standardı DIN 1045, etkinlik faktörünü 0,30 olarak önermiştir. Avrupa standardı prEN 206 kütlece uçucu kül/çimento oranının 0,33'den küçük olması gerektiğini belirterek  $k$ 'nın CEM I 32,5 çimentosu için 0,2, CEM I 42,5 çimentosu için 0,4 alınmasını önermiştir. Şubat 2001 tarihli TS 11222,  $k$  değerini prEN 206'nın önermesini kabul ederek aynı değerleri kullanmıştır [35].

Araştırmacıların çalışmalarından görüldüğü gibi,  $k$  etkinlik faktörünün belirlenmesinde fikir birliğine varılamamıştır. Bunun başlıca nedeni  $k$  değerinin bağlı olduğu etkenlerdir. Uçucu külün cinsi ve kullanım miktarı, çimentonun cinsi ve kullanım miktarı, amaçlanan basınç dayanımı, kür şartları, agrega, betonun işlenebilirliği, dolayısıyla su miktarı ve eklenen kimyasal katkıları,  $k$  etkinlik faktörünün belirlenmesinde etken olmaktadır. Yapılmış olan bu tez çalışmasında Babu ve Rao'nun kullanmış olduğu grafiksel metod kullanılmıştır. Babu ve Rao'nun çalışmasından bağımsız olarak yapılan diğer bir çalışmada ise  $k_e$  genel etkinlik faktörü kullanılmayarak ve ortalama bir basınç dayanımına göre yaklaştırma

yapılarak  $k$  değerine ulaşılmıştır. Bu ikinci çalışmada genel etkinlik değerinin kullanılmamasının nedeni  $k_e$  değerinin belirlenmesindeki kabulün tam anlamıyla belirli olmamasıdır.

Genellikle betonda işlenebilirliği sağlamak ve hidrasyon ısısını düşürmek için kullanılan uçucu küllerin, betonun ilk yaşlardaki mukavemetini düşürdüğü bilinmektedir. Uçucu küllerin beton mukavemetine etkisinin belirlenmesinde büyük oranda yardımcı olan  $k$  etkinlik faktörü, aynı sınıf uçucu küller için bile değişebilmektedir. Varılabilecek olan en uygun çözüm, her bir uçucu kül için ve herbir karışım oranı için ayrı bir  $k$  değeri elde etmek gibi görünmektedir.  $k$  etkinlik faktörünün daha detaylı incelenmesi ve daha detaylı belirlenmesi, uçucu küllü betonlarla istenilen amaç basınç dayanımına ulaşılabilmesi için kolaylık ve kesinlik sağlayacaktır.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **2.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı**

Bu tez çalışmasında, Çayırhan uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmekte ve uçucu kül yüzdesi dikkate alınarak etkinlik faktörü belirlenmekte ve bunun PÇ 42,5 tipi çimentolarda nasıl olduğu belirlenmektedir. Bu sayede uçucu küllerin yerdeğiştirme yüzdesi ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmaktadır.

Çalışmanın ana amacını oluşturan etkinlik faktörü, betonun basınç dayanımına uçucu külün etkisi belirlenerek bulunmaktadır. Üç farklı uçucu kül yerleştirme oranı (0,10, 0,30 ve 0,50) ve beş farklı su/çimento oranı (0,50, 0,60, 0,70, 0,80 ve 0,90) kullanılarak hazırlanan karışımlarla, kontrol betonu da olmak üzere yirmi seri numune üretilmiştir.  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde ve  $20^{\circ}\text{C}$  ile  $\%65\pm 5$  rutubetli ortamda saklanan numunelerin 7., 28. ve 90. günlerde basınç dayanımları ölçülmüş, uçucu küllerin zaman içerisinde betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiş ve bu yolla farklı uçucu kül yerleştirme yüzdeleri için ayrı ayrı etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Etkinlik faktörünün hesaplanması yoluyla, uçucu kül yerleştirme yüzdelerinin betonun basınç dayanımına etkisi hakkında fikir vereceği düşünülmektedir. Çalışmada ayrıca ultrases deneyleri yapılarak numunelerin boşluk miktarları ölçülmüştür.

### **2.2 Üretilen Betonların Özellikleri**

İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılan çalışmada 20 seri beton üretilmiştir. 0,10, 0,30 ve 0,50 oranlarında çimento karışımından çıkarılmış, yerine ağırlıkça aynı miktarda uçucu kül eklenmiş ve 0,50, 0,60, 0,70, 0,80 ve 0,90 su/bağlayıcı madde oranı ile farklı karışımlarda beton üretilmiş buna göre agrega hacminde ayarlama yapılmıştır. Üretilen betonların karışım oranlarına göre isimlendirmesi Tablo 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.1 Üretilen betonların isimlendirilmesi

| Su/Bağlayıcı madde oranı | Uçucu Kül Yerleştirme Yüzdesi (%) | Üretim Grupları |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 0,50                     | 0,00                              | KON50           |
|                          | 0,10                              | S50K10          |
|                          | 0,30                              | S50K30          |
|                          | 0,50                              | S50K50          |
| 0,60                     | 0,00                              | KON60           |
|                          | 0,10                              | S60K10          |
|                          | 0,30                              | S60K30          |
|                          | 0,50                              | S60K50          |
| 0,70                     | 0,00                              | KON70           |
|                          | 0,10                              | S70K10          |
|                          | 0,30                              | S70K30          |
|                          | 0,50                              | S70K50          |
| 0,80                     | 0,00                              | KON80           |
|                          | 0,10                              | S80K10          |
|                          | 0,30                              | S80K30          |
|                          | 0,50                              | S80K50          |
| 0,90                     | 0,00                              | KON90           |
|                          | 0,10                              | S90K10          |
|                          | 0,30                              | S90K30          |
|                          | 0,50                              | S90K50          |

Üretilmiş olan betonlarda, TS EN450'ye göre uçucu küllerle kullanılması uygun görülen PÇ 42,5 çimento kullanılmıştır. Kontrol betonu için çimento dozajı 350 kg/m<sup>3</sup> olup, uçucu küllü betonlar için toplam bağlayıcı (uçucu kül + çimento) dozajı 350 kg/m<sup>3</sup>'dür. Üretilmiş olan numunelerde su/bağlayıcı madde miktarı sabit olduğu için slump ve Ve-Be değerleri değişkendir. Hiçbir katkının kullanılmadığı çalışmada, agrega granülometrisi ve agrega türü aynı kalmış, maksimum dane çapı 32 mm seçilmiştir. Üretilen her seri için 45 dm<sup>3</sup> betona karşılık gelen malzeme kullanılmıştır.

## 2.3 Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

### 2.3.1 Çimento

Deneylerin tamamında, Akçansa Çimento fabrikasında üretilmiş olan PÇ 42,5 tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özelliklerini gösteren deneyler Akçansa Çimento fabrikasından alınmış, fiziksel ve mekanik dayanımını gösteren deneyler ise İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Bu deneylerin sonuçları, Tablo 2.2, Tablo 2.3 ve Tablo 2.4'de görülmektedir.

Tablo 2.2 PÇ 42,5 portland çimentosunun kimyasal özellikleri

| Kimyasal Bileşimin Tanımı      | Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Çözünmeyen SiO <sub>2</sub>    | 0,30                           |
| Çözünen SiO <sub>2</sub>       | 20,42                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,02                           |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,50                           |
| CaO                            | 63,94                          |
| MgO                            | 1,21                           |
| SO <sub>3</sub>                | 2,64                           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,23                           |
| K <sub>2</sub> O               | 0,84                           |
| Cl                             | 0,0290                         |
| Ateş Zaiyatı                   | 1,58                           |
| TOPLAM                         | 99,71                          |
| C <sub>3</sub> S               | 54,57                          |
| C <sub>2</sub> S               | 17,37                          |
| C <sub>3</sub> A               | 7,38                           |
| C <sub>4</sub> AF              | 10,65                          |

Tablo 2.3 PÇ 42,5 portland çimentosunun fiziksel özellikleri

|                                            |                                          |       |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------|
| Özgöl Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )        |                                          | 3,17  |
| Priz Süresi                                | Başlangıç                                | 02:30 |
| (saat:dakika)                              | Son                                      | 04:50 |
| Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm) |                                          | 1     |
| İncelik                                    | Özgöl Yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr | 3390  |
|                                            | 200 µm elek üstünde kalan yüzde (%)      | 0,4   |
|                                            | 90 µm elek üstünde kalan yüzde (%)       | 1,6   |

Tablo 2.4 PÇ 42,5 portland çimentosunun mekanik özellikleri

| Gün | Basınç Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> ) | Eğilme-Çekme Dayanımları (N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 7   | 43,8                                    | 8,1                                           |
| 28  | 49,3                                    | 8,6                                           |

### 2.3.2 Agregalar

Çalışmada kullanılan agregaların türünde ve granülometride değişiklik yapılmamıştır. Agregaların TS 3529'a göre ölçülmüş birim ağırlıkları ve TS 3526'ya

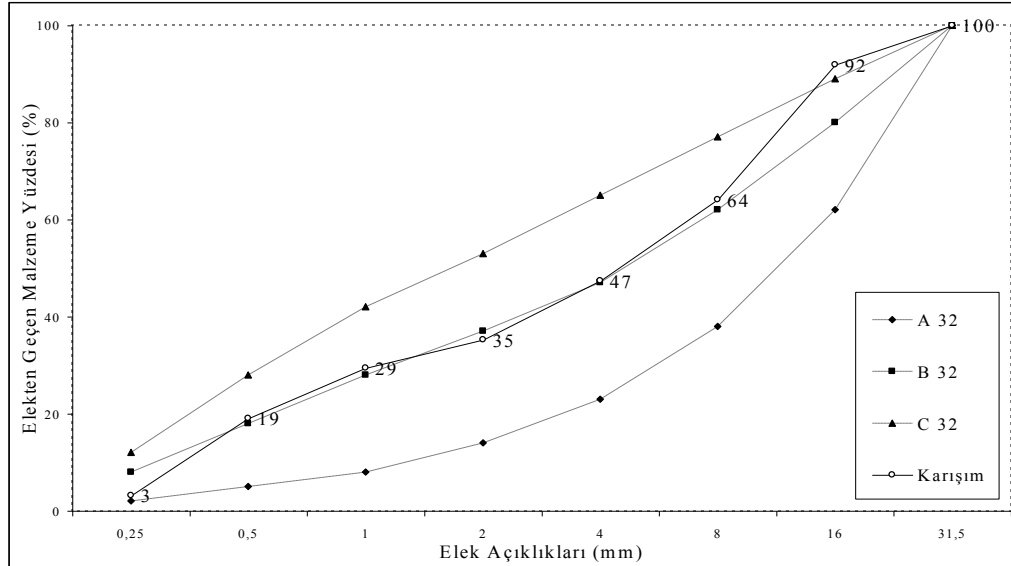
göre ölçülmüş özgül ağırlıkları Tablo 2.5’da gösterilmiştir. Maksimum tane boyutu 32 mm olarak seçilmiştir. Deneylerde kullanılan agregaların TS 3530’a göre yapılan elek analizi sonuçları Tablo 2.6’te görülmektedir. Agregalar karışım granülometrisi B32 eğrisine yakın seçilmiş olup Şekil 2.1’de görülmektedir.

Tablo 2.5 Agregaların birim ağırlık ve özgül ağırlık değerleri

| Malzeme    | Birim ağırlık         | Özgül ağırlık         |
|------------|-----------------------|-----------------------|
|            | (gr/cm <sup>3</sup> ) | (gr/cm <sup>3</sup> ) |
| Kum        | 1,56                  | 2,60                  |
| Kırmataş 1 | 1,43                  | 2,71                  |
| Kırmataş 2 | 1,34                  | 2,72                  |

Tablo 2.6 Agregaların elek analizi sonuçları

| Elek<br>Boyutu (mm) | Elek altına geçen yüzde (%) |                   |                   |         |
|---------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------|
|                     | Kum (% 45)                  | Kırmataş 1 (% 20) | Kırmataş 2 (% 35) | Karışım |
| 31,5                | 100                         | 100               | 100               | 100     |
| 16                  | 100                         | 100               | 77                | 92      |
| 8                   | 100                         | 82                | 8                 | 64      |
| 4                   | 97                          | 18                | 0                 | 47      |
| 2                   | 77                          | 3                 | 0                 | 35      |
| 1                   | 64                          | 2                 | 0                 | 29      |
| 0,5                 | 42                          | 1                 | 0                 | 19      |
| 0,25                | 7                           | 1                 | 0                 | 3       |



Şekil 2.1 TS 706 referans ve karışım granülometri eğrileri

### 2.3.3 Uçucu Külün Özellikleri

Deneylerde, Çayırhan termik santralının atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Çayırhan termik santralinde linyit kömürü kullanılması dolayısıyla, üretilen uçucu kül, ASTM C 618'e göre C sınıfı olarak kabul edilmektedir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Beton Tekniği Bölümü laboratuvarında TS EN 450 ve TS 24'e göre yapılan deneylerde, uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler belirlenmiştir. Uçucu külün pozolanik aktivitesinin belirlenmesinde %25 Uçucu kül ile %75 PÇ karışımı kullanılırken, priz süreleri ve hacim genişlemesi deneylerinde %50 uçucu kül ile %50 PÇ karışımı kullanılmıştır. Bu deneylere ait veriler, Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'da görülmektedir.

Tablo 2.7 Çayırhan uçucu külünün kimyasal bileşimi

| Kimyasal Bileşimin             | Kimyasal Bileşimin | C Sınıfı Uçucu Küller için      | F Sınıfı Uçucu Küller için     |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Tanımı                         | Yüzdesi (%)        | TS EN 450 ve ASTM C 618         | TS EN 450 ve ASTM C 618        |
| SiO <sub>2</sub>               | 50,21              | -                               | -                              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14,74              | -                               | -                              |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,85               | -                               | -                              |
| S+A+F                          | 74,80              | >50 ASTM C 618                  | >70 ASTM C 618                 |
| CaO                            | 13,03              | >10 (Yüksek Kireçli) ASTM C 618 | <10 (Düşük Kireçli) ASTM C 618 |
| MgO                            | 1,09               | -                               | -                              |
| SO <sub>3</sub>                | 3,27               | <3 TS EN 450                    | <3 TS EN 450                   |
| K <sub>2</sub> O               | 2,36               | -                               | -                              |
| Na <sub>2</sub> O              | 3,12               | -                               | -                              |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,72               | -                               | -                              |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,54               | -                               | -                              |
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,10               | -                               | -                              |
| Cl <sup>-</sup>                | 0,0186             | <0,1 TS EN 450                  | <0,1 TS EN 450                 |
| Kızdırma Kaybı                 | 0,75               | <5 TS EN 450                    | <5 TS EN 450                   |
| Serbest CaO                    | 0,78               | <1 TS EN 450                    | <1 TS EN 450                   |

Tablo 2.7, Tablo 2.8 ve Tablo 2.9'dan görüldüğü üzere, Çayırhan uçucu külü, SO<sub>3</sub> miktarı çok az miktarda fazla olmakla beraber C sınıfı uçucu küller için belirtilen standartlara uygun, yüksek kireçli uçucu kül olarak kabul edilebilir. Aktivite endeksi için belirtilmiş olan standart ise yeterince sağlamaktadır.

Tablo 2.8 Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri

|                                            |                                          |       |
|--------------------------------------------|------------------------------------------|-------|
| Özgöl Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )        |                                          | 2,10  |
| Priz Süresi                                | Başlangıç                                | 03:45 |
| (saat:dakika)                              | Son                                      | 05:05 |
| Hacim Sabitliği (Le Chatelier) Toplam (mm) |                                          | 1     |
| İncelik                                    | Özgöl Yüzey (Blaine) cm <sup>2</sup> /gr | 2670  |
|                                            | 200 µm elek üstünde kalan yüzde (%)      | 4,1   |
|                                            | 90 µm elek üstünde kalan yüzde (%)       | 17,8  |
|                                            | 45 µm elek üstünde kalan yüzde (%)       | 32,8  |

Tablo 2.9 Çayırhan uçucu külünün puzolanik aktivite endeksi

| Gün | Aktivite Endeksi (%) | TS EN 450 |
|-----|----------------------|-----------|
| 7   | 64                   | -         |
| 28  | 74                   | >75       |

## 2.4 Beton Karışımları

Harç karışımında en büyük agrega boyutu, granülometresi ve su/bağlayıcı madde oranı sabit tutulmuş, dozaj 350kg/m<sup>3</sup> seçilmiştir. Karışımlarda katkı kullanılmamış, 0,10, 0,30 ve 0,50 oranlarında çimento karışımdan çıkarılmış, yerine ağırlıkça aynı miktarda uçucu kül eklenmiş ve 0,50, 0,60, 0,70, 0,80 ve 0,90 su/bağlayıcı madde oranında beton üretilmiştir. Buna göre her bir su/bağlayıcı madde oranı için kontrol betonuyla birlikte 4 farklı kül oranında, toplamda 20 seri beton üretilmiştir. Her bir karışım için 45 dm<sup>3</sup> beton üretilmiştir. Üretilen 20 seri beton için 1 m<sup>3</sup>'e giren gerçek malzeme miktarları Tablo 2.10'da verilmiştir.

## 2.5 Beton Üretimi, Karıştırma, Yerleştirme, Saklama, Numune Boyutları

Beon üretimi, düşey eksenli karıştırıcı, kendi eksenini etrafında ortalama 1.5 devir/saniye hızla dönen 45 dm<sup>3</sup> kapasiteli kazana sahip karıştırma makinesinde gerçekleştirilmiştir. Karışım, ilk önce su eklenmeden 2 dakika karıştırılmış, ardından su eklenerek 5 dakika ve karışımın kıvamına göre daha fazla olarak karıştırılmıştır. Çökme değerleri sabit olmadığı için yerleştirme sırasında fazla sulu kıvamdaki

su/bağlayıcı madde oranı yüksek numuneler fazla sarsılmadan yerleştirilmiş ancak homojen olmasına dikkat edilmiştir. Yüzeysel vibrasyon makinesinin kullanıldığı yerleştirme sırasında su/bağlayıcı madde oranı düşük numuneler kısım kısım kalıplara yerleştirilerek vibrasyon uygulanmış, yerleştirme sırasında boşluk miktarını azaltmak için bu numuneler tokmaklanmıştır.

45 dm<sup>3</sup> olarak üretilen her bir karışım, toplam 12 adet 15x15x15 cm<sup>3</sup> boyutlarındaki küp kalıplara yerleştirilmiş, 24 saat sonrasında kalıplardan çıkarılarak yarısı 23±2°C su içerisine diğer yarısı 20°C ile %65±5 rutubetli kür odasına konulmuştur. Her bir saklama koşulu için 2 adet numune üretilmiştir. 7., 28. ve 90. günler sonunda numuneler bu ortamlardan çıkarılmış ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

## **2.6 Taze Beton Deneyleri**

Her seride işlenebilirliğin belirlenebilmesi için çökme konisiyle ve Ve-Be vibrasyon aletiyle deneyler yapılmış, karışımların çökme miktarları ve yayılma hızları ölçülmüştür. 8 dm<sup>3</sup>'lük kapta karışımın ağırlığı ölçülerek birim ağırlığı hesaplanmıştır. Üretilmiş olan karışımların birim ağırlıklarının belirlenmesi sonucu karışımındaki gerçek malzeme miktarı, hava ve kompasite hesaplanmıştır. Bu değerler Tablo 2.10'da görülmektedir.

## **2.7 Sertleşmiş Beton Deneyleri**

15x15x15 cm<sup>3</sup> boyutlarında üretilen numuneler, 23±2°C su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli kür odasında saklanmışlardır. 7., 28. ve 90. günler sonunda numunelerin boyutları ölçülmüş, boşluk miktarı belirlenmek üzere ultrases deneyleri yapılmıştır. Daha sonra numuneler, sabit yükleme hızı altında 500 tonluk Amsler marka preste kırılarak basınç dayanımları ölçülmüştür.

Tablo 2.10 Üretilen betonların gerçek bileşimleri (1 m<sup>3</sup> karışıma giren malzemeler)

| BETON<br>KODU | Çimento<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Uçucu Kül<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Kum<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Kırmataş 1<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Kırmataş 2<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Su<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | S/(C+K) | Slump<br>(cm) | Ve-Be<br>(sn) | Hava Miktarı<br>(dm <sup>3</sup> ) | Birim Ağırlık<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Kompasite<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) |
|---------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------|---------------|---------------|------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| KON50         | 352                             | 0                                 | 828                         | 384                                | 674                                | 176                        | 0,50    | 0             | 12            | 5                                  | 2,41                                   | 0,819                                          |
| S50K10        | 316                             | 35                                | 821                         | 380                                | 668                                | 176                        | 0,50    | 0             | 12            | 6                                  | 2,40                                   | 0,818                                          |
| S50K30        | 246                             | 105                               | 808                         | 374                                | 658                                | 176                        | 0,50    | 0             | 11            | 6                                  | 2,37                                   | 0,819                                          |
| S50K50        | 174                             | 174                               | 789                         | 365                                | 642                                | 174                        | 0,50    | 2             | 10            | 14                                 | 2,32                                   | 0,812                                          |
| KON60         | 351                             | 0                                 | 785                         | 364                                | 639                                | 210                        | 0,60    | 4             | 8             | 8                                  | 2,35                                   | 0,782                                          |
| S60K10        | 315                             | 35                                | 778                         | 360                                | 633                                | 210                        | 0,60    | 5             | 7             | 9                                  | 2,33                                   | 0,781                                          |
| S60K30        | 244                             | 105                               | 762                         | 353                                | 620                                | 210                        | 0,60    | 5             | 5             | 12                                 | 2,29                                   | 0,778                                          |
| S60K50        | 176                             | 176                               | 755                         | 350                                | 615                                | 211                        | 0,60    | 7             | 5             | 4                                  | 2,28                                   | 0,785                                          |
| KON70         | 350                             | 0                                 | 742                         | 344                                | 604                                | 245                        | 0,70    | 13            | 4             | 11                                 | 2,28                                   | 0,744                                          |
| S70K10        | 316                             | 35                                | 739                         | 342                                | 601                                | 246                        | 0,70    | 18            | 3             | 6                                  | 2,28                                   | 0,784                                          |
| S70K30        | 246                             | 106                               | 727                         | 337                                | 592                                | 246                        | 0,70    | 21            | 1             | 4                                  | 2,25                                   | 0,749                                          |
| S70K50        | 174                             | 174                               | 705                         | 327                                | 574                                | 243                        | 0,70    | 23            | 0             | 16                                 | 2,20                                   | 0,740                                          |
| KON80         | 352                             | 0                                 | 706                         | 327                                | 574                                | 282                        | 0,80    | 23            | 0             | 4                                  | 2,24                                   | 0,714                                          |
| S80K10        | 316                             | 35                                | 696                         | 323                                | 566                                | 281                        | 0,80    | 24            | 0             | 8                                  | 2,22                                   | 0,711                                          |
| S80K30        | 245                             | 105                               | 681                         | 315                                | 554                                | 280                        | 0,80    | 24            | 0             | 12                                 | 2,18                                   | 0,709                                          |
| S80K50        | 176                             | 176                               | 671                         | 311                                | 546                                | 281                        | 0,80    | 24            | 0             | 6                                  | 2,16                                   | 0,713                                          |
| KON90         | 352                             | 0                                 | 664                         | 308                                | 541                                | 317                        | 0,90    | 24            | 0             | 4                                  | 2,18                                   | 0,679                                          |
| S90K10        | 313                             | 35                                | 649                         | 301                                | 528                                | 313                        | 0,90    | 24            | 0             | 17                                 | 2,14                                   | 0,670                                          |
| S90K30        | 244                             | 105                               | 638                         | 296                                | 519                                | 314                        | 0,90    | 24            | 0             | 14                                 | 2,12                                   | 0,673                                          |
| S90K50        | 172                             | 172                               | 619                         | 287                                | 503                                | 310                        | 0,90    | 25            | 0             | 24                                 | 2,06                                   | 0,665                                          |

### 3. DENEY SONUÇLARI

#### 3.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Taze beton üzerinde çökme, yayılma ve birim ağırlık deneyleri yapılmış, deneyler sonucunda birim ağırlık, hava miktarı ve kompasite değerleri bulunmuştur. Çökme deneyi için TS 2871'e göre alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan kesik çökme konisi kullanılmıştır. Koni 3 kademede doldurularak, her tabaka 25 kez şişlenmiştir. Daha sonra koni sarsılmadan kaldırılarak taze betonun çökme miktarı ölçülmüştür. Ve-Be yayılma deneyinde de aynı koni kullanılmış, koni çıkarıldıktan sonra Ve-Be aleti içerisindeki taze betonun üzerine ağırlık yerleştirilmiş ve vibrasyon uygulanmıştır. Vibrasyon sonucu, taze beton tamamen yayılana kadar geçen zaman, ölçülmüştür. Birim ağırlık deneyinde, taze beton, iç hacmi 8 dm<sup>3</sup>'lük birim ağırlık kabına doldurulmuş iyice yerleşmesi için vibrasyon uygulanmış ve tartılmıştır. Üretilen taze beton deney sonuçları, Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1 Taze beton deney sonuçları

| BETON<br>KODU | Çökme<br>(Slump) (cm) | Ve-Be<br>(sn) | Hava Miktarı<br>(%) | Birim Ağırlık<br>(kg/dm <sup>3</sup> ) | Kompasite<br>(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) |
|---------------|-----------------------|---------------|---------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| KON50         | 0                     | 12            | 0,5                 | 2,41                                   | 0,819                                          |
| S50K10        | 0                     | 12            | 0,6                 | 2,40                                   | 0,818                                          |
| S50K30        | 0                     | 11            | 0,6                 | 2,37                                   | 0,819                                          |
| S50K50        | 2                     | 10            | 1,4                 | 2,32                                   | 0,812                                          |
| KON60         | 4                     | 8             | 0,8                 | 2,35                                   | 0,782                                          |
| S60K10        | 5                     | 7             | 0,9                 | 2,33                                   | 0,781                                          |
| S60K30        | 5                     | 5             | 1,2                 | 2,29                                   | 0,778                                          |
| S60K50        | 7                     | 5             | 0,4                 | 2,28                                   | 0,785                                          |
| KON70         | 13                    | 4             | 1,1                 | 2,28                                   | 0,744                                          |
| S70K10        | 18                    | 3             | 0,6                 | 2,28                                   | 0,784                                          |
| S70K30        | 21                    | 1             | 0,4                 | 2,25                                   | 0,749                                          |
| S70K50        | 23                    | 0             | 1,6                 | 2,20                                   | 0,740                                          |
| KON80         | 23                    | 0             | 0,4                 | 2,24                                   | 0,714                                          |
| S80K10        | 24                    | 0             | 0,8                 | 2,22                                   | 0,711                                          |
| S80K30        | 24                    | 0             | 1,2                 | 2,18                                   | 0,709                                          |
| S80K50        | 24                    | 0             | 0,6                 | 2,16                                   | 0,713                                          |
| KON90         | 24                    | 0             | 0,4                 | 2,18                                   | 0,679                                          |
| S90K10        | 24                    | 0             | 1,7                 | 2,14                                   | 0,670                                          |
| S90K30        | 24                    | 0             | 1,4                 | 2,12                                   | 0,673                                          |
| S90K50        | 25                    | 0             | 2,4                 | 2,06                                   | 0,665                                          |

### 3.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

#### 3.2.1 Basınç Dayanımı

23±2°C su içerisinde ve 20°C ile %65±5 rutubetli kür odasında saklanmış numuneler, 7., 28. ve 90. günler sonunda, önce ultrases daha sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin pres tablasına gelecek boyutları ölçülmüş, daha sonra bu düz yüzeyler üzerinde prese yerleştirilen numuneler sabit yükleme hızı uygulanarak kırılmış, deney sonuçları ton olarak elde edilmiştir. Bu deney sonuçları, önce 9810 ile çarpılarak newtona çevrilmiş(P), ardından basınç dayanımı gerilmesini vermek üzere, kuvvetin etki ettiği numunenin düz yüzey alanına(A) bölünmüştür. Bu şekilde numunelerin basınç dayanımları N/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuştur. Tablo 3.2’de numunelerin basınç dayanımları görülmektedir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Tablo 3.2 Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerleri

| BETON<br>KODU | BASINÇ DAYANIMLARI (N/mm <sup>2</sup> ) |         |         |                                       |         |         |
|---------------|-----------------------------------------|---------|---------|---------------------------------------|---------|---------|
|               | 23±2°C lik Su içinde                    |         |         | 20°C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |         |         |
|               | 7. GÜN                                  | 28. GÜN | 90. GÜN | 7. GÜN                                | 28. GÜN | 90. GÜN |
| KON50         | 35,3                                    | 37,3    | 38,8    | 34,9                                  | 35,5    | 35,9    |
| S50K10        | 33,9                                    | 37,9    | 40,8    | 30,2                                  | 33,1    | 33,8    |
| S50K30        | 27,4                                    | 32,0    | 36,2    | 26,7                                  | 30,5    | 32,9    |
| S50K50        | 17,2                                    | 24,8    | 28,5    | 16,7                                  | 18,5    | 19,5    |
| KON60         | 31,1                                    | 32,9    | 34,3    | 28,1                                  | 28,8    | 29,5    |
| S60K10        | 25,8                                    | 28,9    | 31,4    | 24,2                                  | 27,5    | 30,5    |
| S60K30        | 19,0                                    | 24,0    | 29,8    | 17,7                                  | 22,8    | 24,2    |
| S60K50        | 12,2                                    | 18,4    | 20,4    | 11,1                                  | 16,9    | 18,6    |
| KON70         | 26,1                                    | 29,9    | 32,4    | 24,2                                  | 25,9    | 26,7    |
| S70K10        | 21,0                                    | 29,2    | 32,2    | 19,6                                  | 25,0    | 25,9    |
| S70K30        | 14,3                                    | 20,6    | 22,9    | 13,3                                  | 19,6    | 20,6    |
| S70K50        | 7,7                                     | 13,5    | 17,9    | 7,2                                   | 12,2    | 14,8    |
| KON80         | 15,7                                    | 20,8    | 24,4    | 14,8                                  | 20,5    | 22,7    |
| S80K10        | 15,4                                    | 21,3    | 24,0    | 14,0                                  | 18,8    | 20,2    |
| S80K30        | 9,3                                     | 14,7    | 17,2    | 8,7                                   | 14,0    | 15,5    |
| S80K50        | 5,4                                     | 10,1    | 13,3    | 5,1                                   | 9,4     | 11,7    |
| KON90         | 12,6                                    | 15,9    | 18,1    | 11,6                                  | 13,0    | 15,6    |
| S90K10        | 10,7                                    | 16,9    | 18,9    | 10,0                                  | 15,2    | 17,2    |
| S90K30        | 7,5                                     | 13,8    | 16,1    | 6,9                                   | 13,3    | 14,6    |
| S90K50        | 4,8                                     | 9,2     | 12,5    | 4,5                                   | 8,1     | 9,5     |

### 3.2.2 Ultrases Hızı

Ultrases hızı deneyleri,  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde ve  $20^{\circ}\text{C}$  ile  $\%65\pm 5$  rutubetli kür odasında saklanmış numuneler üzerinde 7., 28. ve 90. günler sonunda yapılmıştır. Numuneler, bulunmuş oldukları ortamdan çıkarıldıktan sonra kuruması beklenmiş, düz bir yüzey üzerinde deney yapılmıştır. Ultrases hızı ölçümü sırasında, numunelerin deneye tabi tutulacak yüzeyleri, gres yağı ile yağlanarak deney aleti ile numune arasındaki hava boşluğu giderilmiştir. Ultrases aleti yardımıyla numune üzerinden ses geçirilirken, bu sesin numuneden geçiş zamanı  $\mu\text{s}$  olarak ölçülmüş, sesin numune üzerinden geçtiği mesafe mm olarak belirlenmiştir. Geçiş mesafesi geçiş zamanına bölünerek, hız, km/s olarak bulunmuştur. Elde edilen hız değerleri Tablo 3.3'te gösterilmektedir.

Tablo 3.3 Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerleri

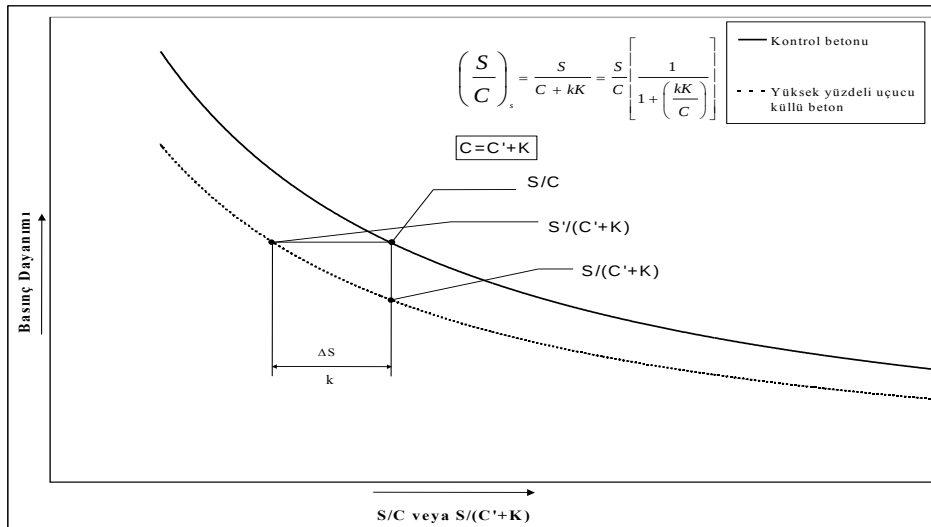
| BETON<br>KODU | ULTRASES HIZI (km/s)                    |         |         |                                                            |         |         |
|---------------|-----------------------------------------|---------|---------|------------------------------------------------------------|---------|---------|
|               | $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ lik Su içinde |         |         | $20^{\circ}\text{C}$ ve $\%65\pm 5$ rutubetli kür odasında |         |         |
|               | 7. GÜN                                  | 28. GÜN | 90. GÜN | 7. GÜN                                                     | 28. GÜN | 90. GÜN |
| KON50         | 4,64                                    | 4,89    | 5,06    | 4,58                                                       | 4,86    | 4,90    |
| S50K10        | 4,43                                    | 4,97    | 5,05    | 4,29                                                       | 4,68    | 4,69    |
| S50K30        | 4,52                                    | 4,99    | 5,08    | 4,39                                                       | 4,79    | 4,82    |
| S50K50        | 4,33                                    | 4,72    | 4,90    | 4,10                                                       | 4,59    | 4,63    |
| KON60         | 4,39                                    | 4,83    | 5,00    | 4,31                                                       | 4,32    | 4,48    |
| S60K10        | 4,27                                    | 4,93    | 5,01    | 4,10                                                       | 4,55    | 4,60    |
| S60K30        | 4,10                                    | 4,86    | 4,90    | 3,98                                                       | 4,55    | 4,59    |
| S60K50        | 3,92                                    | 4,67    | 4,81    | 3,77                                                       | 4,22    | 4,28    |
| KON70         | 4,35                                    | 4,62    | 4,68    | 4,10                                                       | 4,27    | 4,30    |
| S70K10        | 4,23                                    | 4,73    | 4,75    | 3,97                                                       | 4,26    | 4,27    |
| S70K30        | 3,95                                    | 4,60    | 4,65    | 3,94                                                       | 4,18    | 4,21    |
| S70K50        | 3,67                                    | 4,49    | 4,64    | 3,48                                                       | 4,18    | 4,23    |
| KON80         | 4,03                                    | 4,58    | 4,63    | 3,99                                                       | 4,10    | 4,23    |
| S80K10        | 4,07                                    | 4,46    | 4,49    | 3,90                                                       | 4,13    | 4,20    |
| S80K30        | 3,81                                    | 4,21    | 4,47    | 3,49                                                       | 3,92    | 3,98    |
| S80K50        | 3,61                                    | 4,20    | 4,41    | 3,33                                                       | 3,78    | 3,84    |
| KON90         | 3,99                                    | 4,04    | 4,29    | 3,60                                                       | 3,64    | 3,91    |
| S90K10        | 3,75                                    | 4,22    | 4,41    | 3,52                                                       | 3,99    | 4,15    |
| S90K30        | 3,58                                    | 4,18    | 4,41    | 3,39                                                       | 3,84    | 3,92    |
| S90K50        | 3,42                                    | 4,02    | 4,39    | 3,08                                                       | 3,55    | 3,62    |

### 3.2.3 k Etkinlik Faktörünün Belirlenmesi

Bu çalışmada, k etkinlik faktörü, numunelerin basınç dayanımları incelenerek bulunmuştur. Bölüm 1.6'da açıklanmış olan Smith ve Babu ile Rao'nun yapmış

olduğu çalışmalardan yola çıkılarak, numunelerin su/bağlayıcı madde oranları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki incelenmiş ve farklı uçucu küllerin kullanımı ile kontrol betonuna eşit basınç dayanımı elde edilmesi için su/bağlayıcı madde oranında değişiklik yapılması(Abrams) esas alınmıştır. Buna göre, uçucu külün etkinliği, grafiksel olarak belirlenmiştir. Babu ve Rao'nun  $k_e$  ve  $k_p$  olarak ikiye ayırmış oldukları  $k$  etkinlik faktörü, bu çalışmada tek bir sayı olarak, bir seferde bulunmuştur.

$k$  etkinlik faktörünün belirlenmesi için öncelikli olarak, numunelerin basınç dayanımları ve su/bağlayıcı madde oranları arasındaki grafik çizilmiştir. Bu grafik üzerinde kontrol betonu ve uçucu küllü beton arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 3.1 incelendiğinde aynı basınç dayanımına sahip uçucu küllü ve kontrol betonu arasında su/bağlayıcı madde oranının farklılık gösterdiği gözlemlenmektedir. Uçucu küle üretilmiş olan numunenin su/bağlayıcı madde oranında (Smith'in kullanmış olduğu formül) uçucu kül miktarının önüne bir  $k$  etkinlik faktörü eklenerek, uçucu küllü betonunun su/bağlayıcı madde oranı, kontrol betonunun su bağlayıcı madde oranına eşitlenebilir. Burada kullanılmış olan  $k$  etkinlik faktörü, uçucu küllü betonunun o noktadaki uçucu kül etkinliğini basınç dayanımı açısından belirlemektedir. Bu şekilde, deneyler sonucunda grafik üzerinde elde edilmiş her bir nokta için bir  $k$  etkinlik faktörü bulmak, mümkün olmaktadır. Elde edilen değerler, uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesine göre ayrılarak ortalaması alınmış ve böylece herbir uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi için ayrı ayrı  $k$  etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

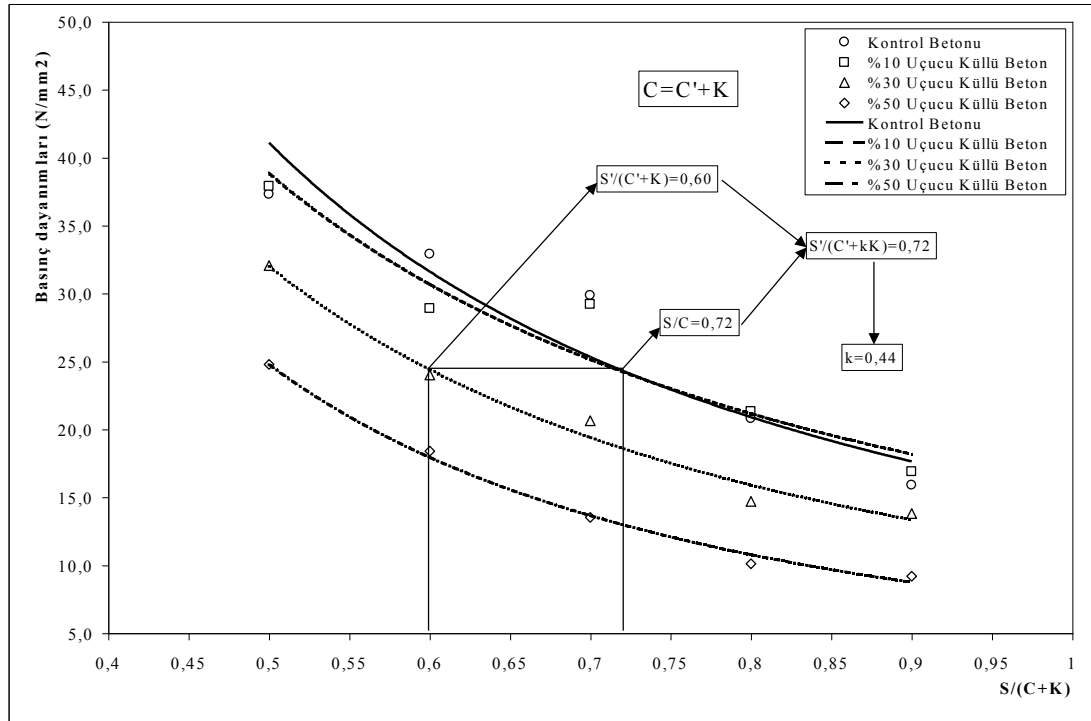


Şekil 3.1  $k$  etkinlik faktörünün belirlenmesinde izlenen grafiksel metod

Yapılmış olan çalışmada, su/bağlayıcı madde oranı sabit tutulmuştur ( $C=C'+K$ ). Uçucu küllü ve kontrol betonunun eşit miktarda bağlayıcı madde içermesi, uçucu külün çimentoya göre etkinliğinin belirlenmesini sağlamaktadır. Aynı basınç dayanımına sahip uçucu küllü ve kontrol betonunda, kontrol betonunun su/bağlayıcı madde oranı  $S/C$ , uçucu küllü betonunun su/bağlayıcı madde oranı ise  $S'/(C'+K)$  olarak Şekil 3.1'de görülmektedir. İki numunenin su/bağlayıcı madde oranı arasındaki farkı su miktarı belirlemektedir ( $C=C'+K$ ). Çalışmalar sırasında üretilen numunelerin su miktarları bilinmektedir. Kontrol betonu ve uçucu küllü betonun su/bağlayıcı madde oranları aşağıdaki denklemdeki gibi eşitlenebilmektedir. Denklemde,  $S$ , kontrol betonunun su miktarı,  $C$ , kontrol betonunun çimento miktarı,  $S'$ , uçucu küllü betonun su miktarı,  $C'$  uçucu küllü betonun çimento miktarı,  $K$ , uçucu küllü betonun uçucu kül miktarı ve  $k$ , etkinlik faktörünü belirtmektedir.

$$\frac{S}{C} = \frac{S'}{C' + kK} \quad (3.2)$$

Denklemde, bütün karışım madde miktarları bilindiği için  $k$  etkinlik faktörü bulunabilmektedir. Bu metodun daha iyi anlaşılabilmesi için bir Şekil 3.2'deki örneğin incelenmesi uygun olacaktır.



Şekil 3.2 28 günlük 23±2°C su içerisinde saklanmış, 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş %30 uçucu küllü numunede  $k$  etkinlik faktörünün belirlenmesi

Şekil 3.2’de görülen örnekte 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş %30 uçucu küllü numunenin 28 günlük basınç dayanımı, 0,72 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş 28 günlük kontrol betonunun basınç dayanımına eşittir. Uçucu küllü betonun aynı su/bağlayıcı madde oranına sahip olabilmesi için k etkinlik faktörü, K uçucu kül miktarı ile çarpılmaktadır. Bu şekilde, 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş %30 uçucu küllü numunenin k etkinlik faktörü, 0,44 olarak bulunmaktadır. Tablo 3.4’te 7., 28. ve 90. günlerde her bir uçucu küllü numunenin k etkinlik faktörü değerleri görülmektedir. Beş farklı su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ortalaması alınarak farklı uçucu kül yerleştirme yüzdeleri için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur.

Tablo 3.4 Grafikselsel metod ile elde edilen k etkinlik faktörü değerleri

| BETON<br>KODU | k ETKİNLİK FAKTÖRÜ                |         |         |                                                    |         |         |
|---------------|-----------------------------------|---------|---------|----------------------------------------------------|---------|---------|
|               | 23±2 <sup>0</sup> C lik Su içinde |         |         | 20 <sup>0</sup> C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |         |         |
|               | 7. GÜN                            | 28. GÜN | 90. GÜN | 7. GÜN                                             | 28. GÜN | 90. GÜN |
| S50K10        | 0,40                              | 0,60    | 0,90    | 0,20                                               | 0,20    | 0,60    |
| S60K10        | 0,33                              | 0,67    | 0,92    | 0,33                                               | 0,67    | 0,67    |
| S70K10        | 0,43                              | 0,86    | 1,00    | 0,29                                               | 1,00    | 0,86    |
| S80K10        | 0,25                              | 1,13    | 1,00    | 0,38                                               | 1,25    | 1,00    |
| S90K10        | 0,33                              | 1,33    | 1,00    | 0,33                                               | 1,44    | 1,22    |
| %10 K         | 0,35                              | 0,92    | 0,96    | 0,31                                               | 0,91    | 0,87    |
| S50K30        | 0,53                              | 0,47    | 0,73    | 0,53                                               | 0,53    | 0,67    |
| S60K30        | 0,44                              | 0,44    | 0,67    | 0,44                                               | 0,56    | 0,56    |
| S70K30        | 0,38                              | 0,48    | 0,57    | 0,38                                               | 0,57    | 0,57    |
| S80K30        | 0,29                              | 0,42    | 0,50    | 0,33                                               | 0,58    | 0,54    |
| S90K30        | 0,22                              | 0,44    | 0,44    | 0,26                                               | 0,59    | 0,37    |
| %30 K         | 0,37                              | 0,45    | 0,58    | 0,39                                               | 0,57    | 0,54    |
| S50K50        | 0,40                              | 0,48    | 0,48    | 0,40                                               | 0,32    | 0,28    |
| S60K50        | 0,37                              | 0,43    | 0,47    | 0,37                                               | 0,30    | 0,27    |
| S70K50        | 0,31                              | 0,40    | 0,43    | 0,31                                               | 0,31    | 0,29    |
| S80K50        | 0,25                              | 0,38    | 0,40    | 0,30                                               | 0,33    | 0,30    |
| S90K50        | 0,24                              | 0,36    | 0,38    | 0,24                                               | 0,31    | 0,29    |
| %50 K         | 0,32                              | 0,41    | 0,43    | 0,33                                               | 0,31    | 0,28    |

#### 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

##### 4.1 Taze Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çökme ve Ve-Be deneylerine tabi tutulmuş olan numunelerin deney sonuçları Tablo 4.1’de gösterilmektedir. Uçucu kül miktarının çimentoya oranla artışı ile bağlayıcı maddelerin ıslanma yüzeyinin artacağı ve dolayısıyla su ihtiyacının artacağı söylenebilir. Basit ikame metodunun kullanıldığı bu çalışma, uçucu küllerin işlenebilirliğe etkisinin incelenmesinde referans olarak kullanılabilir.

Tablo 4.1 Taze betonun çökme ve Ve-Be deneyi sonuçları

| BETON<br>KODU | Çökme<br>(Slump) (cm) | Ve-Be<br>(sn) |
|---------------|-----------------------|---------------|
| KON50         | 0                     | 12            |
| S50K10        | 0                     | 12            |
| S50K30        | 0                     | 11            |
| S50K50        | 2                     | 10            |
| KON60         | 4                     | 8             |
| S60K10        | 5                     | 7             |
| S60K30        | 5                     | 5             |
| S60K50        | 7                     | 5             |
| KON70         | 13                    | 4             |
| S70K10        | 18                    | 3             |
| S70K30        | 21                    | 1             |
| S70K50        | 23                    | 0             |
| KON80         | 23                    | 0             |
| S80K10        | 24                    | 0             |
| S80K30        | 24                    | 0             |
| S80K50        | 24                    | 0             |
| KON90         | 24                    | 0             |
| S90K10        | 24                    | 0             |
| S90K30        | 24                    | 0             |
| S90K50        | 25                    | 0             |

Numunelerin üretimi sırasında sabit su miktarları kullanılması, çökme ve Ve-Be deneyleri sonucunda elde edilen verilerden 0,60 ve 0,70 su/bağlayıcı madde oranına sahip olan numuneler, değerlendirilme konusunda belirleyici olmaktadır. Belirli bir çökme değerinin kullanılmamış olması nedeniyle, su/bağlayıcı madde oranı düşük olan numunelerdeki çökme, sıfır veya sıfıra yakın değerler, su/bağlayıcı madde oranı yüksek olan numunelerdeki çökme ise yüksek ve birbirine yakın değerler almaktadır. Ancak, 0,60 ve 0,70 su/bağlayıcı madde oranına sahip numuneler karşılaştırıldığında, uçucu kül yüzdesinin artışı ile çökme değerlerinin arttığı ve Ve-Be zamanlarının düştüğü görülmektedir. Bu veriler ışığında uçucu kül kullanımının taze betondaki işlenebilirliği arttırdığı söylenebilmektedir.

Çimento ve uçucu kül arasında ağırlıkça yerdeğiştirmenin yapıldığı çalışmada uçucu külün özgül ağırlığının düşük olması nedeniyle bağlayıcı madde miktarı hacimce artmaktadır. Bağlayıcı maddenin hacimce artması nedeniyle agrega hacmi azaltılarak ayarlama yapılmaktadır. Bağlayıcı maddenin hacimce artışı sözkonusu olduğu için su ihtiyacının artacağı düşünülebilir, ancak tam aksine su ihtiyacı azalmakta ve işlenebilirlik artmaktadır. Pozolanik reaksiyonun geç başladığından yola çıkılırsa karışıma eklenen uçucu külün ince agrega gibi davrandığı ve kohezyonu arttırdığı ve dolayısıyla işlenebilirliği arttırdığı söylenebilir. Önceki yıllarda ki araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalarla da paralellik gösteren bu verilerden uçucu külün çimento yerine kullanılması ile işlenebilirliğin arttığı söylenmektedir [12-16].

## **4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

### **4.2.1 Basınç Dayanımı Sonuçlarının İrdelenmesi**

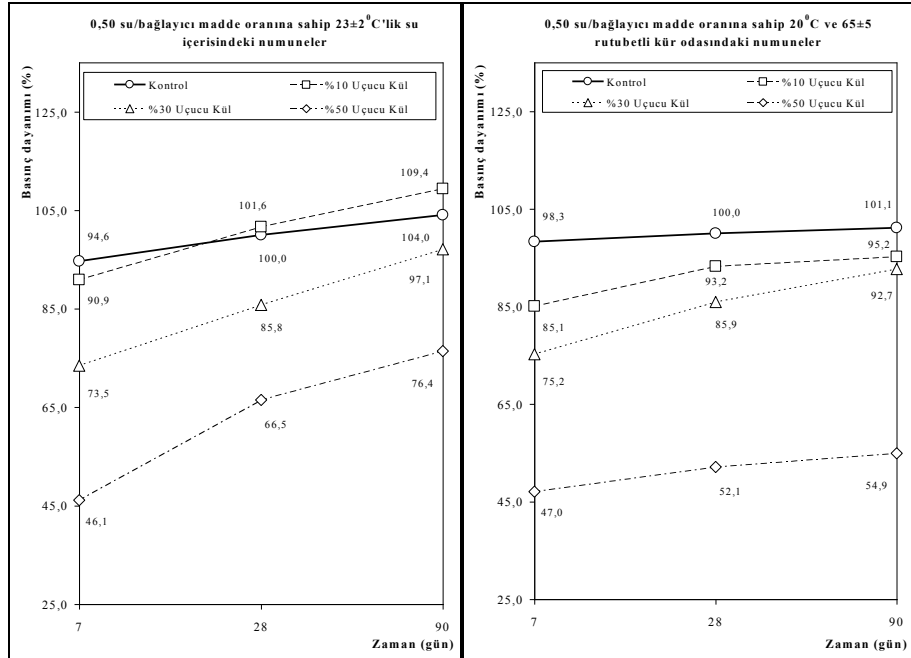
Tablo 3.2’de verilmiş basınç dayanımı deney sonuçları, Tablo 4.2’de farklı su/çimento oranlarına sahip 28. gün kontrol betonlarına göre yüzde olarak kıyaslanarak verilmiştir. Tablo 4.2 incelendiğinde su/bağlayıcı madde miktarı arttıkça numunelerin daha düşük dayanım kazandıkları, 90. gündeki dayanımlarının arttığı gözlemlenmektedir.

Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’te numunelerin basınç dayanımları farklı kür koşullarına ve uçucu kül yüzdelerine göre zamana bağlı olarak irdelenmektedir.

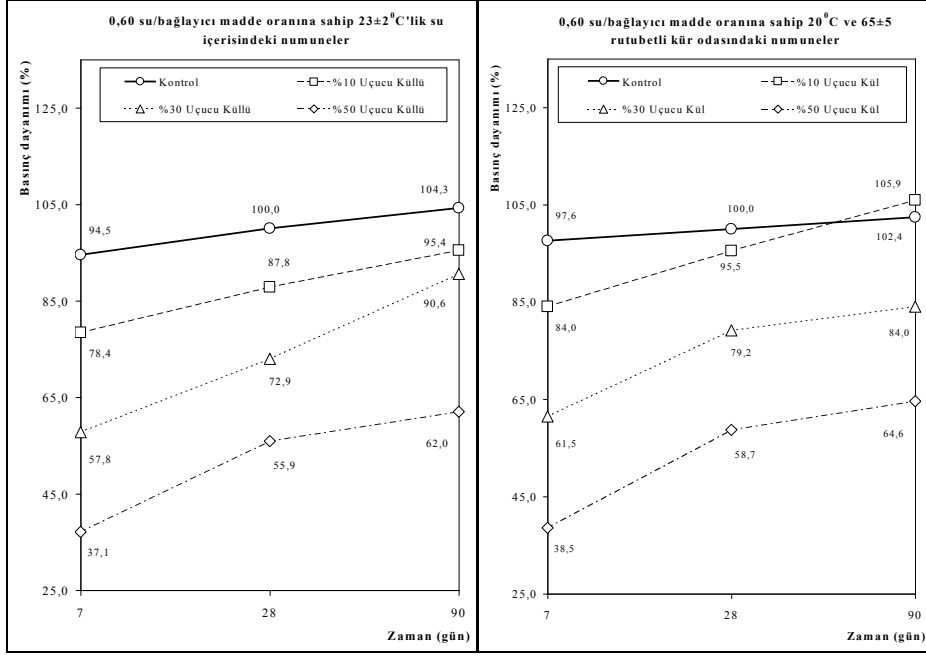
Şekil 4.1’e baktığımızda 0,50 su/bağlayıcı madde oranına sahip uçucu küllü numunelerin kontrol betonuna göre, özellikle ilk yaşlarda düşük dayanımlara sahip olduğu görülmektedir. Uçucu küllü numunelerin dayanımları kontrol betonuna göre daha fazla artış göstermekte, hatta %10 uçucu küle sahip numunelerin ileriki yaşlardaki dayanımlarının kontrol betonununundaki fazla olduğu görülmektedir.  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisindeki numunelerle karşılaştırıldığında,  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $65\pm 5$  rutubetli kür koşullarındaki uçucu küllü numunelerin basınç dayanımı kazanma hızları ise 28. günden sonra düşmektedir.

Tablo 4.2 Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

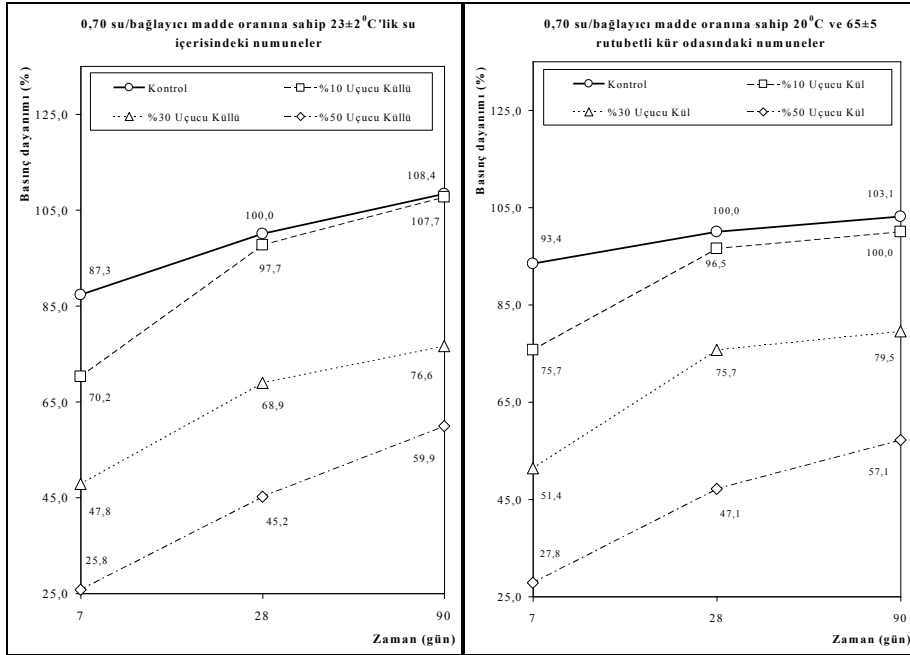
| BETON KODU | BASINÇ DAYANIMLARI (%)            |              |         |                                                    |              |         |
|------------|-----------------------------------|--------------|---------|----------------------------------------------------|--------------|---------|
|            | 23±2 <sup>0</sup> C lik Su içinde |              |         | 20 <sup>0</sup> C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |              |         |
|            | 7. GÜN                            | 28. GÜN      | 90. GÜN | 7. GÜN                                             | 28. GÜN      | 90. GÜN |
| KON50      | 94,6                              | <b>100,0</b> | 104,0   | 98,3                                               | <b>100,0</b> | 101,1   |
| S50K10     | 90,9                              | 101,6        | 109,4   | 85,1                                               | 93,2         | 95,2    |
| S50K30     | 73,5                              | 85,8         | 97,1    | 75,2                                               | 85,9         | 92,7    |
| S50K50     | 46,1                              | 66,5         | 76,4    | 47,0                                               | 52,1         | 54,9    |
| KON60      | 94,5                              | <b>100,0</b> | 104,3   | 97,6                                               | <b>100,0</b> | 102,4   |
| S60K10     | 78,4                              | 87,8         | 95,4    | 84,0                                               | 95,5         | 105,9   |
| S60K30     | 57,8                              | 72,9         | 90,6    | 61,5                                               | 79,2         | 84,0    |
| S60K50     | 37,1                              | 55,9         | 62,0    | 38,5                                               | 58,7         | 64,6    |
| KON70      | 87,3                              | <b>100,0</b> | 108,4   | 93,4                                               | <b>100,0</b> | 103,1   |
| S70K10     | 70,2                              | 97,7         | 107,7   | 75,7                                               | 96,5         | 100,0   |
| S70K30     | 47,8                              | 68,9         | 76,6    | 51,4                                               | 75,7         | 79,5    |
| S70K50     | 25,8                              | 45,2         | 59,9    | 27,8                                               | 47,1         | 57,1    |
| KON80      | 75,5                              | <b>100,0</b> | 117,3   | 72,2                                               | <b>100,0</b> | 110,7   |
| S80K10     | 74,0                              | 102,4        | 115,4   | 68,3                                               | 91,7         | 98,5    |
| S80K30     | 44,7                              | 70,7         | 82,7    | 42,4                                               | 68,3         | 75,6    |
| S80K50     | 26,0                              | 48,6         | 63,9    | 24,9                                               | 45,9         | 57,1    |
| KON90      | 79,2                              | <b>100,0</b> | 113,8   | 89,2                                               | <b>100,0</b> | 120,0   |
| S90K10     | 67,3                              | 106,3        | 118,9   | 76,9                                               | 116,9        | 132,3   |
| S90K30     | 47,2                              | 86,8         | 101,3   | 53,1                                               | 102,3        | 112,3   |
| S90K50     | 30,2                              | 57,9         | 78,6    | 34,6                                               | 62,3         | 73,1    |



Şekil 4.1 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



Şekil 4.2 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri



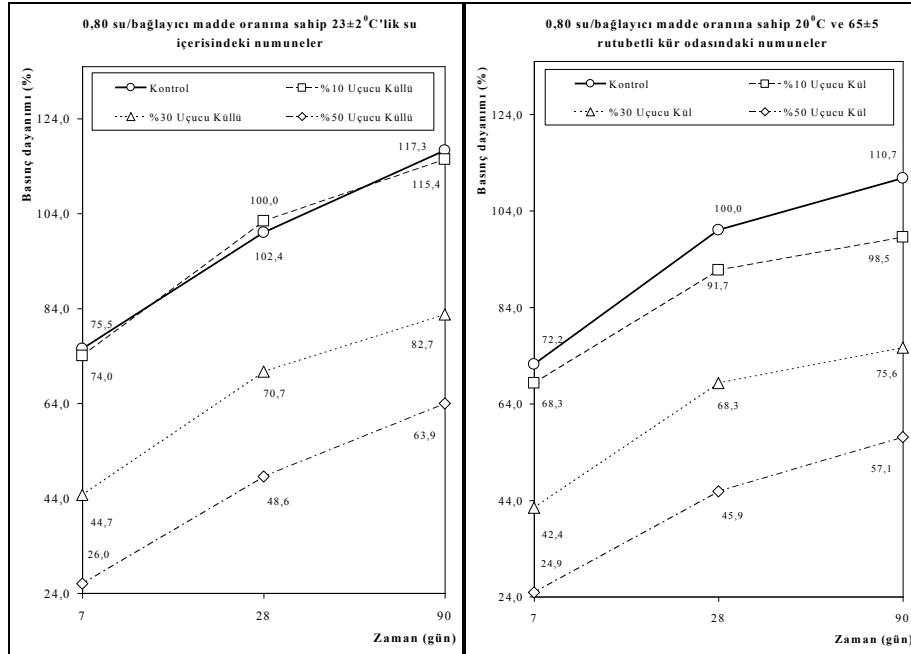
Şekil 4.3 0,70 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

0,60 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin gösterildiği Şekil 4.2 incelendiğinde, Şekil 4.1'le aynı özelliklere rastlanmakta ancak uçucu küllü numunelerin basınç dayanımı kazanım hızlarının düştüğü görülmektedir. 20°C ve 65±5 rutubetli kür koşullarındaki %10 uçucu küllü numunelerin 90. gündeki basınç dayanımlarının kontrol betonuna göre yüksek olduğu görülse de %30 ve %50 uçucu

küllü numunelerin dayanım kazanma hızları,  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisindeki numunelere oranla genelde azalmaktadır.

Şekil 4.3'te ise 0,70 su/bağlayıcı madde oranına sahip numuneler görülmektedir. Şekil 4.2'yle aynı karakteri gösteren grafikteki numunelerin işlenebilirlik değerlerinin kullanılabilir olduğu gözönüne alınırsa, Şekil 4.3, uçucu küllü betonların kontrol betonuna basınç dayanımı açısından kıyaslanmasında referans olarak alınabilir.

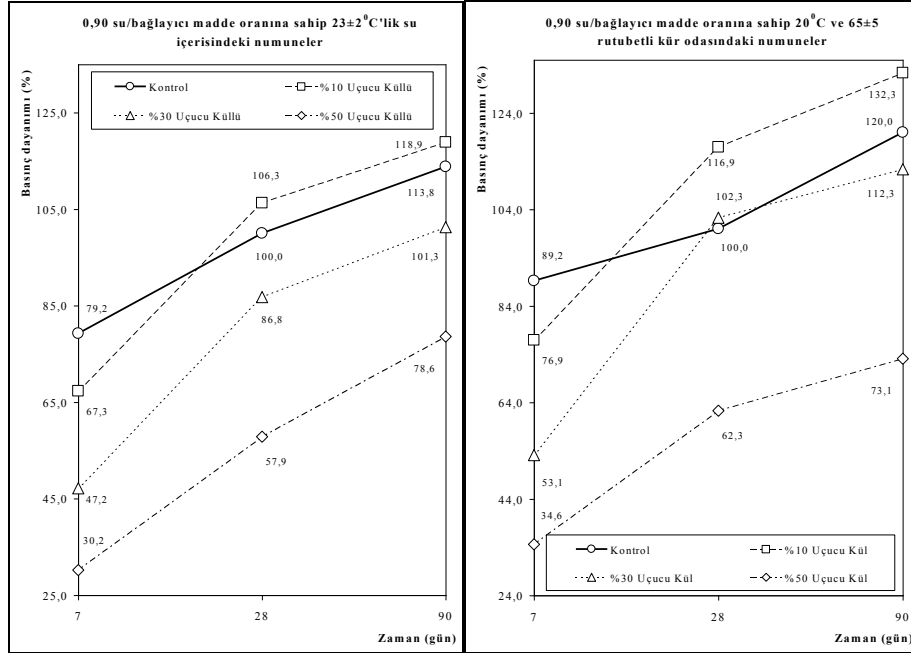
Şekil 4.4'te 0,80 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin basınç dayanımı zaman grafiği incelendiğinde 90.gündeki dayanımların düşük su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelere göre arttığı gözlemlenmektedir. %30 ve %50 uçucu küllü numunelerin basınç dayanımlarının %10 uçucu küllü ve kontrol betonuna göre azaldığı, Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'le karşılaştırıldığında görülebilir.



Şekil 4.4 0,80 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 4.5'teki 0,90 su/bağlayıcı madde oranına sahip numuneler incelendiğinde %10 uçucu küllü numunelerin 28. ve 90. gündeki dayanımlarının kontrol betonundan hem  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde hem de  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $65\pm 5$  rutubetli kür koşullarında yüksek olduğu gözlemlenmektedir. 0,90 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin su miktarının fazla ve basınç dayanımlarının düşük olduğu bilinmektedir. Buradan yola çıkarak, düşük mukavemetli betonlarda belirli bir uçucu kül kullanım yüzdesine kadar 28. gün ve sonrasındaki basınç dayanımlarını arttırdığı söylenebilir. Nitekim,

Haque ve arkadaşları da yaptıkları çalışmada düşük mukavemetli betonlarda aynı sonuçlara ulaşımlardır [14].



Şekil 4.5 0,90 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin basınç dayanımı-zaman grafikleri

Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 birarada incelendiğinde uçucu kül yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmekte olup bunun başlıca nedeni çimento miktarındaki azalmadır. Asıl bağlayıcı olan çimento miktarının azalmasının mukavemeti azaltacağı düşünülmekle beraber çimentonun ortaya çıkarardığı kireç miktarı da azalmaktadır. Uçucu külün pozolanik reaksiyona girmesi için ihtiyaç duyduğu kirecin azalması mukavemetin ileri yaşlarda da düşük olmasına neden olmaktadır.

%10 uçucu külün bazı su/bağlayıcı madde oranlarında kullanımının ileri yaşlardaki dayanımı arttırdığı, yapılmış olan deneylerden elde edilen bir diğer sonuçtur. Uçucu külün çimentoyla ağırlıkça yer değiştirmesi, bağlayıcı madde miktarını hacimce arttırmakta ve agrega hacmi azalmaktadır. Bağlayıcı madde miktarının hacimce artması, %10 uçucu küllü betonun mukavemeti ileri yaşlarda arttırmasına neden olarak söylenebilmektedir. Uçucu kül yüzdesinin artışıyla mukavemetin artmamasının nedeni ise yukarıda anlatıldığı gibi yeterli kirecin bulunmayışı olarak söylenebilir.

Düşük yüzdeli uçucu kül kullanımı, ileri yaşlarda mukavemeti arttırırsa da tüm uçucu kül kullanım yüzdelğinde ilk dayanımların düştüğü görülmektedir.

20°C ve 65±5 rutubetli ortamda saklanmış numuneler, 23±2°C su içerisinde saklanmış numunelerle karşılaştırıldığında daha düşük mukavemete sahip olduğu görülmektedir. Kullanılan uçucu kül yüzdesinin artması ile rutubetli ortamdaki numunelerin dayanımının su içerisindeki numunelere göre azaldığı yine elde edilen verilere göre söylenebilmektedir.

Elde edilen deney verileri, uçucu kül kullanım yüzdesinin basınç dayanımı üzerinde farklı sonuçlar doğurduğu göstermektedir. Düşük yüzdelerde uçucu kül kullanımının kontrol betonuna oranla olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Uçucu kül yüzdesinin kullanımda bu denli farklı sonuçlar göstermesi her bir uçucu kül yüzdesi için ayrı çalışma yapılmasını ve ayrı etkinlik faktörü değerleri bulunmasını gerekli kılmaktadır.

Tablo 4.3'te basınç dayanımı değerleri uçucu kül yerleştirme yüzdesine göre 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ve 28. gün referans olmak üzere yüzdesel olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 4.3 Deney sonuçlarından elde edilen basınç dayanımı değerlerinin uçucu kül kullanım yüzdesine göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

| BETON<br>KODU | BASINÇ DAYANIMLARI (%) |         |         |                                       |         |         |
|---------------|------------------------|---------|---------|---------------------------------------|---------|---------|
|               | 23±2°C lik Su içinde   |         |         | 20°C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |         |         |
|               | 7. GÜN                 | 28. GÜN | 90. GÜN | 7. GÜN                                | 28. GÜN | 90. GÜN |
| KON50         | 94,6                   | 100,0   | 104,0   | 98,3                                  | 100,0   | 101,1   |
| KON60         | 83,4                   | 88,2    | 92,0    | 79,2                                  | 81,1    | 83,1    |
| KON70         | 70,0                   | 80,2    | 86,9    | 68,2                                  | 73,0    | 75,2    |
| KON80         | 42,1                   | 55,8    | 65,4    | 41,7                                  | 57,7    | 63,9    |
| KON90         | 33,8                   | 42,6    | 48,5    | 32,7                                  | 36,6    | 43,9    |
| S50K10        | 89,4                   | 100,0   | 107,7   | 91,2                                  | 100,0   | 102,1   |
| S60K10        | 68,1                   | 76,3    | 82,8    | 73,1                                  | 83,1    | 92,1    |
| S70K10        | 55,4                   | 77,0    | 85,0    | 59,2                                  | 75,5    | 78,2    |
| S80K10        | 40,6                   | 56,2    | 63,3    | 42,3                                  | 56,8    | 61,0    |
| S90K10        | 28,2                   | 44,6    | 49,9    | 30,2                                  | 45,9    | 52,0    |
| S50K30        | 85,6                   | 100,0   | 113,1   | 87,5                                  | 100,0   | 107,9   |
| S60K30        | 59,4                   | 75,0    | 93,1    | 58,0                                  | 74,8    | 79,3    |
| S70K30        | 44,7                   | 64,4    | 71,6    | 43,6                                  | 64,3    | 67,5    |
| S80K30        | 29,1                   | 45,9    | 53,8    | 28,5                                  | 45,9    | 50,8    |
| S90K30        | 23,4                   | 43,1    | 50,3    | 22,6                                  | 43,6    | 47,9    |
| S50K50        | 69,4                   | 100,0   | 114,9   | 90,3                                  | 100,0   | 105,4   |
| S60K50        | 49,2                   | 74,2    | 82,3    | 60,0                                  | 91,4    | 100,5   |
| S70K50        | 31,0                   | 54,4    | 72,2    | 38,9                                  | 65,9    | 80,0    |
| S80K50        | 21,8                   | 40,7    | 53,6    | 27,6                                  | 50,8    | 63,2    |
| S90K50        | 19,4                   | 37,1    | 50,4    | 24,3                                  | 43,8    | 51,4    |

23±2<sup>0</sup>C su içerisindeki ve 20<sup>0</sup>C ile %65±5 rutubetli ortamdaki numuneler, uçucu kül yerleştirme yüzdelere göre Tablo 4.3'te birbiriyle karşılaştırıldığında %30 ve %50 uçucu küllü numunelerin 28.gün sonunda %10 uçucu küllü numunelere göre su/bağlayıcı madde oranı arttıkça daha az dayanım kazandığı görülmektedir. Ancak düşük uçucu küllü numunelerin 90. gündeki dayanımları, 28. gündeki dayanımlarına göre yüksek uçucu küllü numunelerle karşılaştırıldığında arttığı görülmektedir. Bu oluşumlara sebep olarak ortamdaki kireç miktarı gösterilebilmektedir. Rutubetli kür odasındaki numunelerin mukavemet değerlerinin düşmesine neden olarakta yine ortamdaki çimentonun daha az hidratasyon yapması ve dolayısıyla daha az kireç oluşturması söylenebilmektedir.

#### 4.2.2 Ultrases Hızı Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Tablo 3.3'de verilmiş ultrases hızı deney sonuçları, Tablo 4.4'de farklı su/çimento oranlarına sahip 28. gün kontrol betonlarına göre yüzde olarak kıyaslanarak verilmiştir.

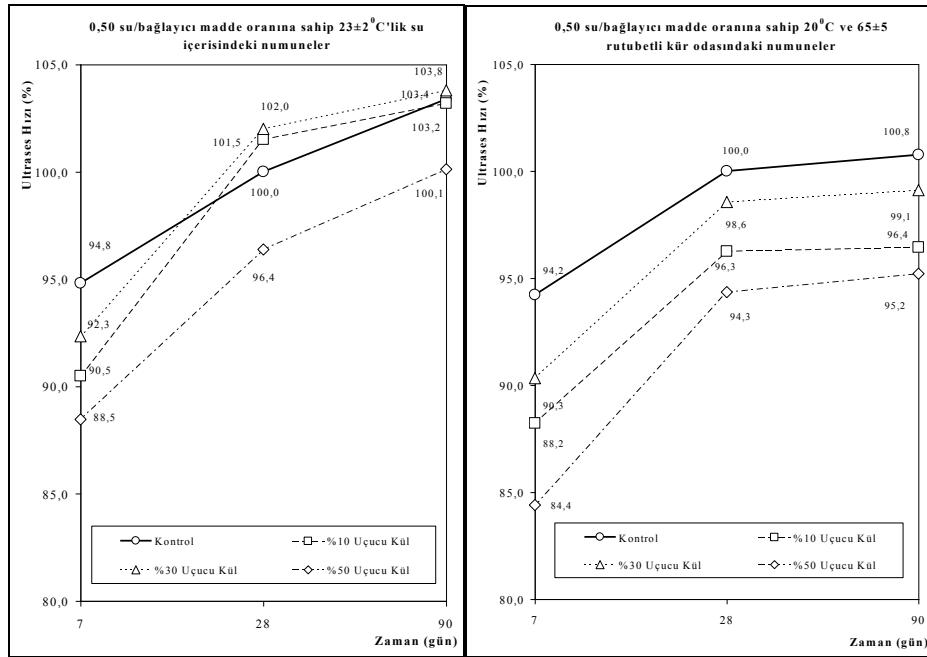
Tablo 4.4 Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin 28 günlük kontrol betonlarına göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

| BETON<br>KODU | ULTRASES HIZI (%)                 |              |         |                                                    |              |         |
|---------------|-----------------------------------|--------------|---------|----------------------------------------------------|--------------|---------|
|               | 23±2 <sup>0</sup> C lik Su içinde |              |         | 20 <sup>0</sup> C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |              |         |
|               | 7. GÜN                            | 28. GÜN      | 90. GÜN | 7. GÜN                                             | 28. GÜN      | 90. GÜN |
| KON50         | 94,8                              | <b>100,0</b> | 103,4   | 94,2                                               | <b>100,0</b> | 100,8   |
| S50K10        | 90,5                              | 101,5        | 103,2   | 88,2                                               | 96,3         | 96,4    |
| S50K30        | 92,3                              | 102,0        | 103,8   | 90,3                                               | 98,6         | 99,1    |
| S50K50        | 88,5                              | 96,4         | 100,1   | 84,4                                               | 94,3         | 95,2    |
| KON60         | 90,8                              | <b>100,0</b> | 103,5   | 99,6                                               | <b>100,0</b> | 103,6   |
| S60K10        | 88,5                              | 102,0        | 103,7   | 94,9                                               | 105,2        | 106,4   |
| S60K30        | 85,0                              | 100,7        | 101,4   | 92,1                                               | 105,2        | 106,2   |
| S60K50        | 81,1                              | 96,6         | 99,6    | 87,2                                               | 97,6         | 99,0    |
| KON70         | 94,2                              | <b>100,0</b> | 101,2   | 95,9                                               | <b>100,0</b> | 100,6   |
| S70K10        | 91,5                              | 102,4        | 102,8   | 92,9                                               | 99,7         | 99,9    |
| S70K30        | 85,4                              | 99,5         | 100,6   | 92,2                                               | 97,9         | 98,5    |
| S70K50        | 79,4                              | 97,2         | 100,4   | 81,5                                               | 97,8         | 99,0    |
| KON80         | 88,0                              | <b>100,0</b> | 101,1   | 97,4                                               | <b>100,0</b> | 103,2   |
| S80K10        | 88,9                              | 97,4         | 98,0    | 95,2                                               | 100,7        | 102,5   |
| S80K30        | 83,2                              | 92,0         | 97,6    | 85,1                                               | 95,6         | 97,1    |
| S80K50        | 78,8                              | 91,6         | 96,3    | 81,3                                               | 92,3         | 93,7    |
| KON90         | 98,7                              | <b>100,0</b> | 106,1   | 98,9                                               | <b>100,0</b> | 107,5   |
| S90K10        | 92,9                              | 104,4        | 109,1   | 96,9                                               | 109,7        | 114,1   |
| S90K30        | 88,4                              | 103,3        | 109,1   | 93,4                                               | 105,6        | 107,8   |
| S90K50        | 84,6                              | 99,5         | 108,6   | 84,6                                               | 97,5         | 99,5    |

Ultrases hızı deney sonuçları, Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da farklı kür koşullarına ve uçucu kül yüzdelere göre, zamana bağlı olarak,

boşluk miktarı az olan numunelerden ultrasesin daha hızlı geçeceği göz önüne alınarak irdelenmektedir.

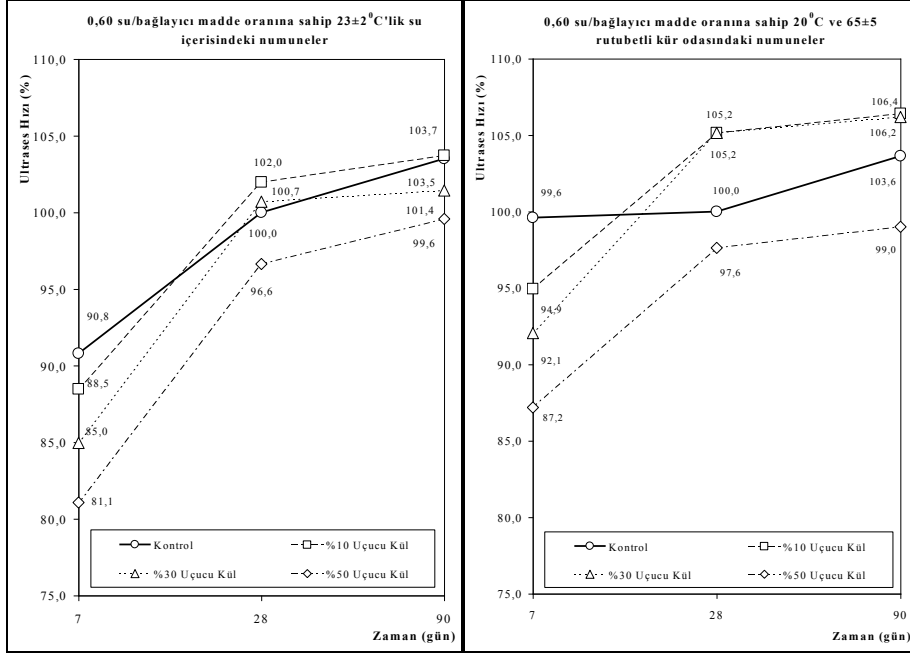
Şekil 4.6’da 0,50 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ultrases-zaman grafikleri incelendiğinde  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde saklanmış %10 ve %30 uçucu küllü betonların 28. ve 90. günlerde kontrol betonundan daha yüksek ultrases hızı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Rutubetli ortamda ise uçucu küllerin boşluk miktarına olumlu etkisi gözlemlenmemektedir.



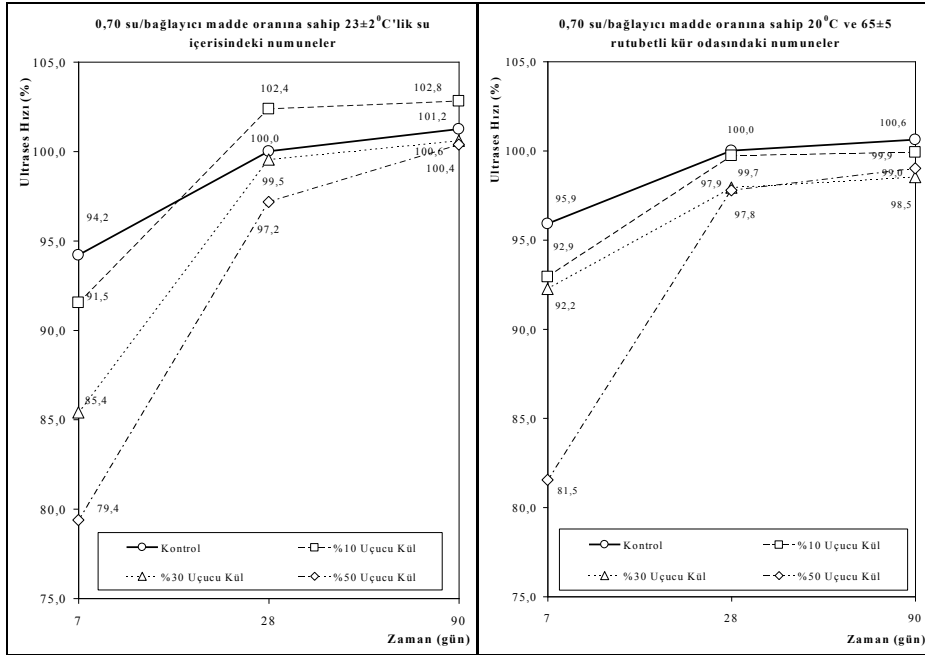
Şekil 4.6 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri

0,60 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ultrases-zaman grafiğini gösteren Şekil 4.7, Şekil 4.6 ile benzer özellikler göstermektedir. Ancak Şekil 4.6’dan farklı olmak üzere rutubetli ortamdaki %10 ve %30 uçucu küllü betonlar da kontrol betonuna göre daha yüksek ultrases hızı değerlerine sahiptir.

0,70 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ultrases-zaman grafiğinin görüldüğü Şekil 4.8’de uçucu küllü betonların kontrol betonundan hem ilk hem de ileriki yaşlarda daha düşük ultrases hızı değerlerine sahip olduğu görülmektedir.  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde saklanmış olan %10 uçucu küllü numuneler kontrol betonuna göre iyi sonuç vermişse de özellikle rutubetli ortamda uçucu kül miktarı arttıkça ilk yaşlardaki ultrases hızı değerlerinin düştüğü görülmüştür. Rutubetli ortamda görülen bu durum, yüksek uçucu küllü numunelerin ilk yaşlarda ortam koşullarına dayanıksız olabileceğini düşündürmektedir.

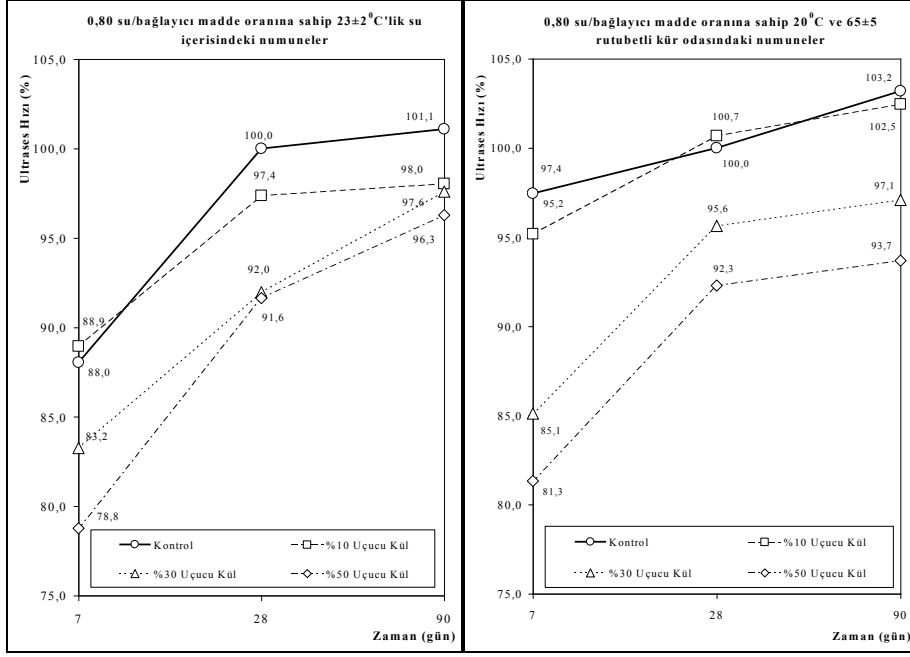


Şekil 4.7 0,60 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri



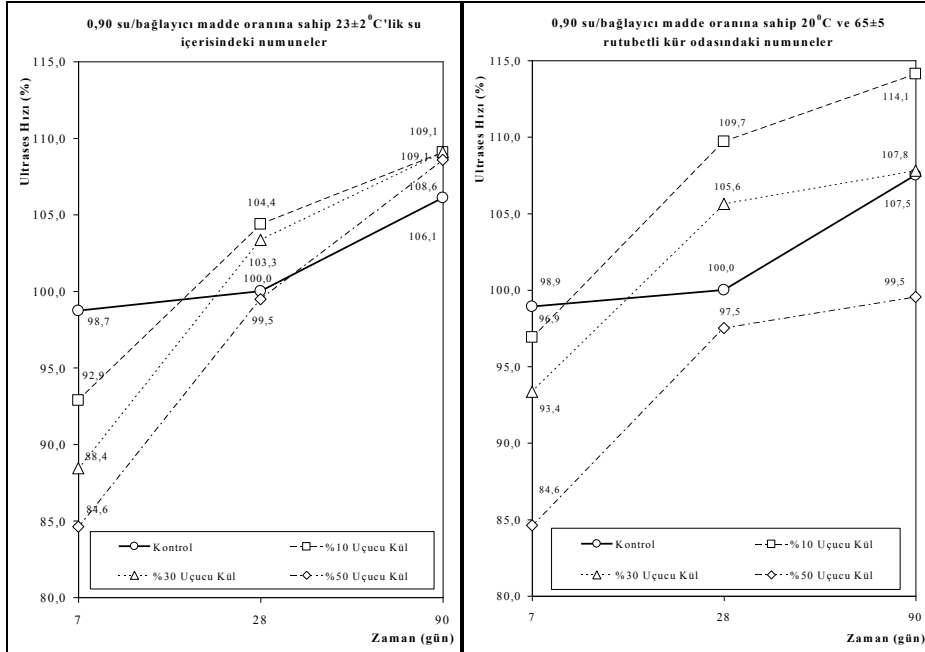
Şekil 4.8 0,70 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri

Şekil 4.8’de gözlemlenen durum, 0,80 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ultrases-zaman grafiğini gösteren Şekil 4.9’da da gözlemlenmektedir. Su/bağlayıcı madde oranının artması ile yüksek uçucu küllü numunelerin betondaki ultrases hızı değerlerine olumsuz yönde etkili olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.9 0,80 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri

Şekil 4.10'da ise 0,90 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerin ultrases-zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 4.10'da uçucu küllü numunelerin ultrases hızı değerlerini kontrol betonuna göre arttırdığı görülmektedir. Bu durum 0,90 su/bağlayıcı madde sahip numunelerin basınç dayanımı-zaman grafiği ile paralellik göstermektedir.



Şekil 4.10 0,90 su/bağlayıcı madde oranı ile üretilmiş farklı kür koşullarındaki numunelerin ultrases hızı-zaman grafikleri

Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'daki ultrases-zaman grafikleri incelendiğinde Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'teki basınç dayanımı-zaman grafikleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Buradan da anlaşılabilceği gibi ultrases hızının artması ile basınç dayanımının arttığı söylenebilir.

Ultrases-zaman grafikleri incelendiğinde uçucu küllü numunelerin 7. gündeki ultrases hızının az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise puzolanik reaksiyonun kireç oluşumunu beklemesi nedeniyle geç başlamasıdır.

Özellikle su/bağlayıcı madde oranı düşük olan numunelerde uçucu külün ileriki yaşlarda boşluk miktarına olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Çimentonun hidratasyonu sonucu beton içerisinde serbest kireç açığa çıkmakta, daha sonra bu kireç su içerisinde çözünmekte ve yeri boş kalmaktadır. Uçucu küllerin puzolanik reaksiyon sırasında bu kireci kullandığı düşünülürse, kireçten dolayı oluşacak boşluk miktarı azalacaktır. Uçucu küllerin boşluk miktarına olumlu yöndeki etkisi bu şekilde izah edilebilir.

20<sup>0</sup>C ve 65±5 rutubetli ortamda saklanmış numuneler, 23±2<sup>0</sup>C su içerisinde saklanmış numuneler ile karşılaştırıldığında ise genellikle uçucu kül kullanımının boşluk miktarına olumlu etkisinin azaldığı görülmektedir.

Boşluk miktarının ortam şartlarına dayanıklılıkla yakından ilgisi olduğu düşünülürse uçucu küllerin düşük yüzdelerle kullanımının durabiliteye olumlu yönde etkisi olacağı söylenebilir. Ancak konunun daha iyi araştırılması için kılcallık v.b. deneylerin yapılması gerekmektedir.

Tablo 4.5'te ultrases hızı değerleri uçucu kül yerleştirme yüzdesine göre 0,50 su/bağlayıcı madde oranı ve 28. gün referans olmak üzere yüzdesel olarak sınıflandırılmıştır.

Tablo 4.5 incelendiğinde yüksek yüzdeli uçucu kül kullanımının su/bağlayıcı madde oranı azaldıkça ultrases hızı değerlerini düşük uçucu küllü numunelere göre genellikle arttırdığı görülmektedir. Buradan yüksek yüzdeli uçucu kül kullanımının boşluk miktarını azalttığı söylenebilir. Buna sebep olarak yüksek yüzdeli uçucu kül kullanıldığında uçucu külün ince agrega davranması gösterilebilir. Rutubetli ortamdaki numunelerde de bu sonuçlar kısmen görülmektedir.

Tablo 4.5 Deney sonuçlarından elde edilen ultrases hızı değerlerinin uçucu kül kullanım yüzdesine göre yüzdesel olarak karşılaştırılması

| BETON<br>KODU | ULTRASES HIZI (%)               |         |         |                                                    |         |         |
|---------------|---------------------------------|---------|---------|----------------------------------------------------|---------|---------|
|               | 20 <sup>0</sup> C lik Su içinde |         |         | 20 <sup>0</sup> C ve % 65±5 rutubetli kür odasında |         |         |
|               | 7. GÜN                          | 28. GÜN | 90. GÜN | 7. GÜN                                             | 28. GÜN | 90. GÜN |
| KON50         | 94,8                            | 100,0   | 103,4   | 94,2                                               | 100,0   | 100,8   |
| KON60         | 89,6                            | 98,7    | 102,2   | 88,5                                               | 88,9    | 92,1    |
| KON70         | 89,0                            | 94,5    | 95,6    | 84,3                                               | 87,9    | 88,4    |
| KON80         | 82,4                            | 93,6    | 94,6    | 82,1                                               | 84,3    | 87,0    |
| KON90         | 81,6                            | 82,6    | 87,7    | 74,0                                               | 74,8    | 80,4    |
| S50K10        | 89,1                            | 100,0   | 101,7   | 91,7                                               | 100,0   | 100,2   |
| S60K10        | 86,0                            | 99,2    | 100,9   | 87,7                                               | 97,1    | 98,3    |
| S70K10        | 85,2                            | 95,3    | 95,6    | 84,8                                               | 91,0    | 91,2    |
| S80K10        | 82,0                            | 89,8    | 90,4    | 83,4                                               | 88,2    | 89,7    |
| S90K10        | 75,6                            | 84,9    | 88,8    | 75,3                                               | 85,2    | 88,7    |
| S50K30        | 90,5                            | 100,0   | 101,8   | 91,7                                               | 100,0   | 100,6   |
| S60K30        | 82,2                            | 97,4    | 98,2    | 83,0                                               | 94,8    | 95,8    |
| S70K30        | 79,1                            | 92,2    | 93,2    | 82,3                                               | 87,3    | 87,8    |
| S80K30        | 76,4                            | 84,4    | 89,5    | 72,8                                               | 81,8    | 83,0    |
| S90K30        | 71,6                            | 83,7    | 88,3    | 70,8                                               | 80,2    | 81,8    |
| S50K50        | 91,8                            | 100,0   | 103,9   | 89,5                                               | 100,0   | 100,9   |
| S60K50        | 83,0                            | 99,0    | 102,0   | 82,2                                               | 92,0    | 93,3    |
| S70K50        | 77,8                            | 95,2    | 98,4    | 75,9                                               | 91,1    | 92,2    |
| S80K50        | 76,5                            | 89,0    | 93,5    | 72,7                                               | 82,5    | 83,7    |
| S90K50        | 72,5                            | 85,3    | 93,1    | 67,1                                               | 77,3    | 78,9    |

#### 4.2.3 k Etkinlik Faktörünün İrdelenmesi

Bu tez çalışmasında yapılmış olan deneysel çalışmaların asıl hedefi elde edilen basınç dayanımı değerleri kullanılarak k etkinlik faktörünün bulunmasında bir metod geliştirmektir. Bu amaçla bölüm 3.2.3'te belirtilen metod geliştirilmiştir.

Kullanılmış olan metodda basınç dayanımı-su/bağlayıcı madde oranı grafiklerinde herbir nokta için ayrı ayrı k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. k etkinlik faktörünün bulunmasında kontrol ve uçucu küllü betonlardaki bağlayıcı madde miktarları birbirine eşitlenmiştir. Smith'in ileri sürmüş ve kullanmış olduğu  $C=C'+kK$  formülün de Smith'den farklı olmak üzere tek bir k etkinlik faktörü bulunmaya çalışılmamış etkinlik faktörü değerleri uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesine bağlı olarak birbirinden ayrılmıştır.

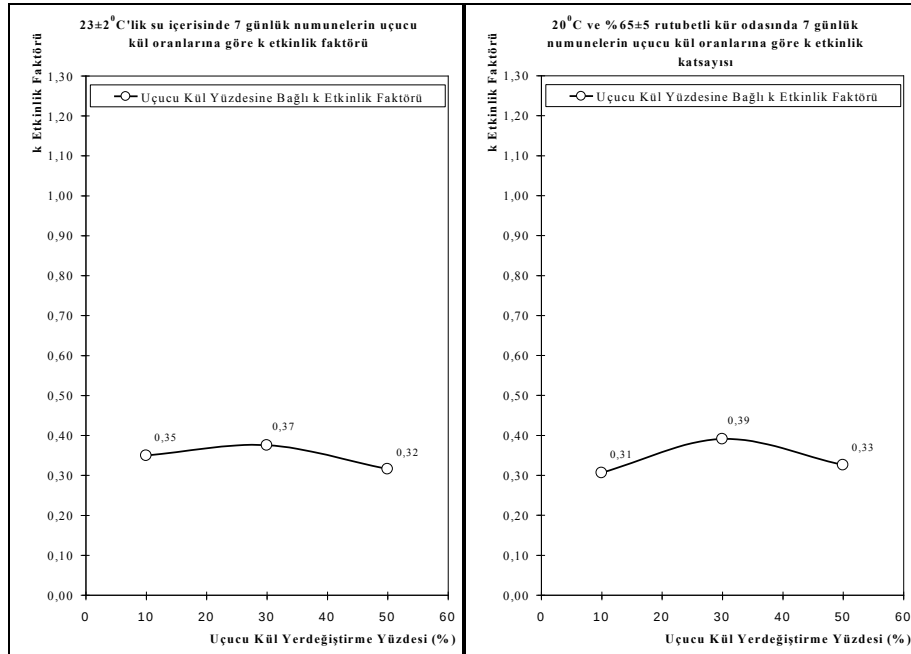
Babu ve Rao'nun kullanmış olduğu metodla benzerlik gösteren bu çalışmanın farkı k etkinlik faktörü değerinin  $k_e+k_p$  olmak üzere ikiye ayrılmamasıdır. Babu ve Rao'nun ileri sürmüş oldukları sabit  $k_e=0,50$  genel etkinlik faktörü değeri belirsizlik göstermektedir. Çalışmalarında elde ettikleri  $k_e=0,50$  değerinin her bir uçucu kül tipi için farklılık göstereceği gözden kaçırılmamalıdır. Bu nedenle k etkinlik faktörü

değerinin  $k_e+k_p$  olmak üzere ikiye ayrılması sonuç olarak elde edilecek toplam  $k$  etkinlik faktörü değerinin belirlenmesinde önem teşkil etmemektedir.

Çalışma sırasında bulunan  $k$  etkinlik faktörü değerleri herbir uçucu kül yüzdesine göre aritmetik ortalaması alınarak sınıflandırılmıştır. Uçucu kül yüzdesine göre sınıflandırmanın başlıca sebebi farklı uçucu kül kullanım yüzdelerinin betonun basınç dayanımı üzerinde farklı sonuçlar göstermesidir. Basınç deneyi sonuçlarından da görüleceği gibi düşük yüzdeli uçucu kül kullanımı ile ileri yaşlarda kontrol betonuna yakın değerlere ulaşılabilmektedir

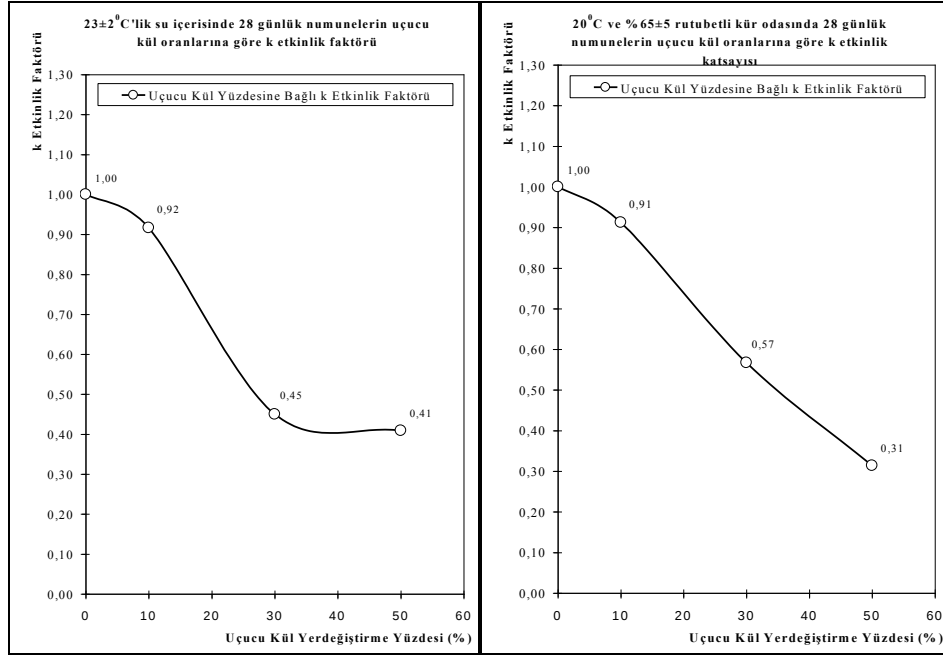
Yapılmış olan basınç deneyi sonuçlarının kullanılması sonucunda elde edilen  $k$  etkinlik faktörü değerleri Tablo 3.4'te görülmektedir. Bu sonuçların daha iyi incelenebilmesi için  $k$  etkinlik faktörü-uçucu kül yüzdesi grafikleri ortam şartları ve zamana bağlı olarak Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmektedir.

7. gündeki etkinlik faktörlerinin değerlendirildiği Şekil 4.11'i incelediğimizde uçucu küllü numunelerin bütün yerleştirme yüzdelerinde düşük etkinliğe sahip olduğu gözlemlenir. Bunun nedeni ise erken yaşlarda puzolanik reaksiyonun gerçekleşmemesidir.



Şekil 4.11 Farklı kür koşullarındaki numunelerin 7. gündeki  $k$  etkinlik faktörü-uçucu kül yerleştirme yüzdesi grafikleri

Şekil 4.12’de 28.gündeki etkinlik faktörü değerleri incelenmektedir. Görüleceği üzere %10 uçucu küllü numunelerin etkinlik faktörü değerleri %30 ve %50 uçucu küllü numunelere göre her iki saklama koşulu için de fazladır.



Şekil 4.12 Farklı kür koşullarındaki numunelerin 28. gündeki k etkinlik faktörü- uçucu kül yerleştirme yüzdesi grafikleri

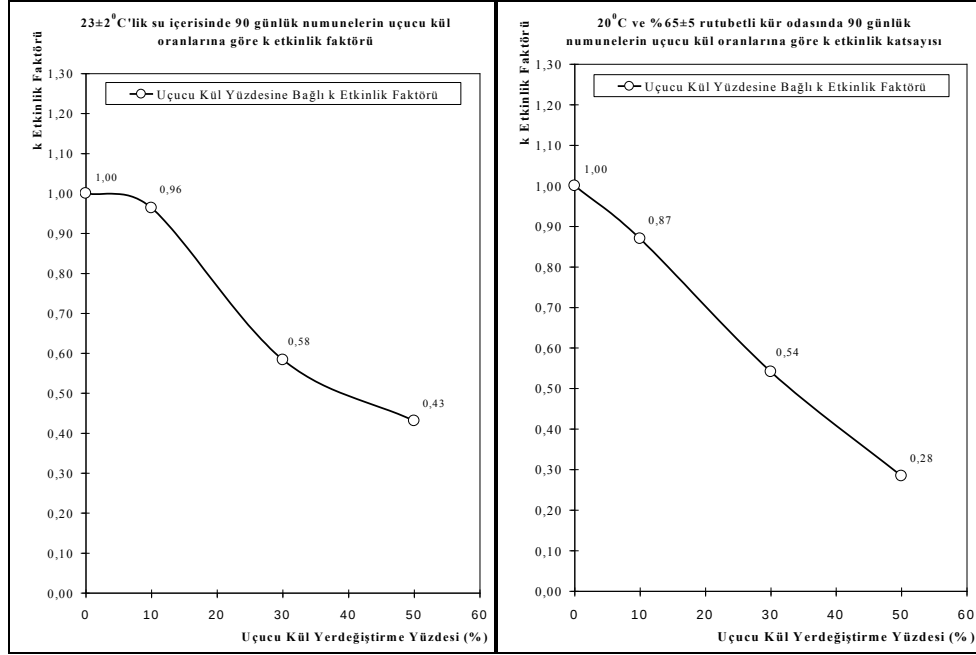
Şekil 4.13’te ise 90. gündeki etkinlik faktörü değerleri incelenmektedir. Şekil 4.12’le aynı karakteri gösteren Şekil 4.13’te de düşük yerleştirme yüzdelerinde uçucu külün etkinliği fazla iken, uçucu kül kullanım yüzdesi arttıkça etkinlik düşmektedir.

k etkinlik faktörü- uçucu kül yerleştirme yüzdesi grafiklerinden anlaşılabileceği gibi ileri yaşlardaki uçucu kül etkinliği, yerleştirme yüzdesine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. İlk yaşlarda ise uçucu küllerin etkinliği yerleştirme yüzdesine bağlı olarak değişmemektedir.

Kür koşulları göz önüne alındığında, %50 gibi yüksek yüzdeli uçucu kül kullanımı ile 20°C ve 65±5 rutubetli kür odasındaki numunelerin etkinliğinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç ise ultrasen sonuçları ile paralellik göstermektedir.

Tüm k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde zaman içerisinde puzolanik reaksiyonun gerçekleşmesi ile k etkinlik faktörü değerlerinin genelde arttığı görülmektedir. 90. gün ve sonrasında k etkinlik faktörü değerlerinin artacağı düşünülse de özellikle yüksek uçucu küllü numunelerde kireç miktarının az olması

nedeniyle k etkinlik faktörü değerlerinin artışının bir noktadan sonra duracağı beklenmelidir.



Şekil 4.13 Farklı kür koşullarındaki numunelerin 90. gündeki k etkinlik faktörü- uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi grafikleri

k etkinlik faktörü hakkında daha önce yapılmış olan çalışmalara bu tez çalışmasını yorumlamak için fayda vardır. Bölüm 1.5'te de anlatıldığı üzere k etkinlik faktörünün bulunması ve kullanılması, birçok araştırmacı tarafından karışık ve zor olarak nitelendirilmiştir. Ancak bu tez çalışılmasından da anlaşılabacağı gibi k etkinlik faktörü değerinin uçucu kül kullanım yüzdesine göre incelenmesi daha açıklayıcı olmaktadır.

Harrison, Tip 1 çimentosu ile yaptığı çalışmada kullanılan uçucu kül için k değerinin 0,3 ile 0,5 aralığında olduğunu belirtmiştir. Yine, Tip 1 42,5 çimento ve %30 uçucu kül kullanılarak üretilen betonda, k değerinin 0,2 ile 0,45 arasında olduğunu bulmuştur. Harrison'a göre uçucu kül kullanımı arttıkça k değeri düşmekte, uçucu kül kullanımı azaldıkça k değeri yükselmektedir [39].

Akman ve Yücel, C sınıfı uçucu küllerle Bolomey formülünü kullanarak yaptıkları çalışmada, k etkinlik katsayısının siliko ve sülfö-kalsik uçucu küllerde 0,14 ile 0,57 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir [37].

Güler, F sınıfı Orhaneli uçucu küllerle Bolomey formülünü kullanarak yaptığı çalışmalarda, k etkinlik faktörünün 0,36 ile 0,17 arasında değiştiğini söylemiş, ancak k etkinlik faktörünün değişken olduğunu belirtmiştir [38].

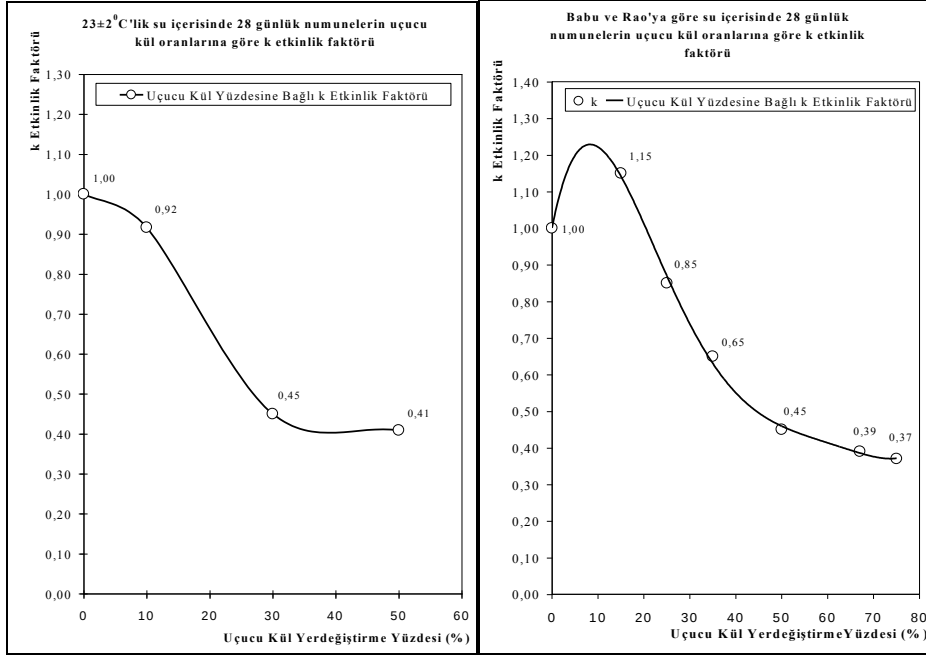
Özcan, ürettiği betonlarda Bolomey formülünü kullanarak bulduğu k etkinlik faktörü, C ve F sınıfı uçucu küller için sırasıyla 0,79 ve 0,62'dir. Ancak, eklenen uçucu kül miktarının çıkarılan çimento miktarından daha az olduğu dikkate alınmalıdır. Bu çalışmada gözlenen bir özellikte C sınıfı uçucu küllerin bağlayıcılıklarının daha fazla olması ve erken yaşlardaki dayanımlarının daha iyi olması nedeniyle k etkinlik faktörlerinin de yüksek olmasıdır [39].

Smith, 20 farklı uçucu kül ile yaptığı deneylerde 28 günlük basınç dayanımları için 0,231 değerini elde etmiş ve 0,25 değerini optimum etkinlik faktörü için teklif etmiştir [36].

Alman standardı DIN 1045, etkinlik faktörünü 0,30 olarak önermiştir. Avrupa standardı prEN 206 kütlece uçucu kül/çimento oranının 0,33'den küçük olması gerektiğini belirterek k'nın CEM I 32,5 çimentosu için 0,2, CEM I 42,5 çimentosu için 0,4 alınmasını önermiştir. Şubat 2001 tarihli TS 11222, k değerini prEN 206'nın önermesini kabul ederek aynı değerleri kullanmıştır [35].

Yukarıdaki araştırmacıların elde ettiği değerlerden anlaşılabacağı gibi herhangi bir k etkinlik faktörü değeri üzerinde mutabakata varılamamıştır. Bunun başlıca sebebi ise uçucu kül yer değiştirme yüzdesinin dikkate alınmamasıdır.

Babu ve Rao, C ve F sınıfı uçucu külleri %75, %67, %50, %35, %25 ve %15 oranlarında beton içerisinde kullanmışlar ve bu sonuçlar ışığında herbir uçucu kül yüzdesi için k etkinlik faktörü değerleri elde etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda k etkinlik faktörü değerinin uçucu külün yerleştirme oranına göre değiştiğini gözlemlemişler ve bunu Şekil 1.6'te görünen grafikte ifade etmişlerdir. Bu tez çalışmasında elde edilen veriler Şekil 1.6 ile paralellik göstermektedir. Ancak Babu ve Rao'nun elde etmiş olduğu veriler, farklı tipteki uçucu küllerin kullanılması ile elde edilmiştir. C ve F sınıfı uçucu küllerin içermiş oldukları kireç dolayısıyla farklı bağlayıcılık gösterdikleri de dikkate alınırsa bu verilerin herbir uçucu kül tipi ve sınıfı için ayrılarak verilmesinde fayda vardır. Babu ve Rao'nun 28 günlük su içerisinde saklanmış numuneleri ile bu tez çalışmasından elde edilmiş olan verilerin karşılaştırması Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14 Babu ve Rao ile bu tez çalışmasında elde edilmiş olan 28. günlük numunelerin k etkinlik faktörü-uçucu kül yerleştirme yüzdesi grafikleri karşılaştırması

Şekil 4.14'ten de görüleceği üzere Babu ve Rao'nun araştırma sonuçları ile bu tez çalışmasının sonuçları benzer sonuçlar göstermektedir. Ancak, Babu ve Rao'nun farklı uçucu külleri aynı grafikte topladığı gözden kaçırılmamalıdır. Aynı zamanda bu grafikteki maksimum noktasının belirlenmesi de matematiksel açıdan yetersiz kalmaktadır. Maksimum noktasının %10 uçucu kül yüzdesinin üstünde veya altında olabileceği bilinmelidir. Bunun için daha dar bir uçucu kül kullanım yüzdesi aralığında deneyler yapılmalıdır.

Yapılmış olan deneyler göstermektedir ki k etkinlik faktörü tek bir değer olarak alınamamaktadır. Kullanılacak olan uçucu kül miktarına veya yüzdesine bağlı olarak k etkinlik faktörünün belirlenmesi önem arz etmektedir.

Tez çalışmasından elde edilen k etkinlik faktörü değerleri, basit ikame metoduyla yani çıkarılan çimentoya eşit miktarda uçucu külün betona yerleştirilmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen k etkinlik faktörü değerleri, kısmi ikame metoduyla üretilecek betonlarda kullanılmaktadır. Bu şekilde çıkarılan çimentonun yerine hangi miktarlarda uçucu kül yerleştirileceği belirlenebilmektedir.

Çalışma sonucunda elde edilen k etkinlik faktörü değerleri kullanıldığında, basınç dayanımı su/bağlayıcı madde eğrisi şeklinde kontrol betonunun grafiği ile uçucu küllü betonların grafikleri bir noktada kesişmekte yani benzer karakterde grafik

oluşturmaktadır. Kısmi ikame metodunda belirlenmiş olan  $k$  etkinlik faktörü değerleri kullanılarak basınç dayanımı su/bağlayıcı madde grafikleri çizildiğinde aynı karakteristikte garafiklere ulaşılabilceği öngörülmektedir. İleri araştırmalar ile bu verilerin kontrol edilmesi düşünölmelidir.

Yani mevcut  $k$  etkinlik faktörleri dikkate alınarak, uçucu küllü betonlar dökölerek, kontrol eğrisi ile çakışıp çakışmadığı incelenmelidir.

Kısmi ikame metodunda  $k$  etkinlik faktörünün kullanılması için işlenebilirliğin ve uçucu kül kullanım yüzdesinin belirlenmesi bu çalışmadan çıkarılan en önemli sonuç olmaktadır. Çalışmanın daha net olarak incelenebilmesi için farklı uçucu kül tiplerinin farklı çimento tipleri ve çimento dozajlarında kullanılması ve benzer karakterde  $k$  etkinlik faktörü-uçucu kül kullanma yüzdesi grafiğı elde edilip edilmediğı araştırılmalıdır. Kimyasal katkıların kullanılması ile uçucu küllerin beton içerisinde davranış şekli daha detaylı incelenmelidir. Bu şekilde elde edilecek veriler ışığında herbir uçucu kül için ayrı  $k$  etkinlik faktörü değerleri, ayrı kullanım yüzdelerine göre belirlenmeli ve kısmi ikame metoduna göre beton içerisinde kullanılmalıdır.

## 5. SONUÇLAR

Çayırhan santralinden elde edilmiş C sınıfı uçucu külle üretilen betonlarda mekanik özellikler, uçucu kül yerleştirme yüzdelere göre incelenmiş ve elde edilen basınç dayanımı sonuçları kullanılarak k etkinlik faktörü değerleri bulunmuştur. Bulunmuş olan k etkinlik faktörü değerleri, uçucu kül yerleştirme yüzdelere, zamana ve kür şartlarına bağlı olarak irdelenmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde ultrases hızı deneyleri yapılmış, geçiş hızları, zamana, uçucu kül yerleştirme yüzdesine ve kür şartlarına bağlı olarak irdelenmiştir. Çalışmanın ana amacı Babu ve Rao'nun önermiş olduğu yöntemin geçerliliğinin ve uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesinin k etkinlik faktörü değerine etkisinin incelenmesidir. Elde edilen sonuçlar şöyledir;

- Yapılmış olan taze beton deneyleri sonucunda sadece 0,60 ve 0,70 su/bağlayıcı madde oranına sahip numunelerde uçucu külün işlenebilirliğe katkısı hakkında yorum yapılabilmektedir. Çökme ve Ve-Be deneyleri sonucunda Çayırhan uçucu külünün su ihtiyacını azalttığı ve işlenebilirliği artırdığı görülmüştür.
- Basınç dayanımı deneyleri sonucunda su/bağlayıcı madde oranı düşük olan numunelerin daha yüksek mukavemet verdiği ve su/bağlayıcı madde oranı düşük olan numunelere göre daha hızlı mukavemet kazandığı görülmüştür. Uçucu küllü betonların erken yaşlardaki dayanımlarının bütün yerleştirme yüzdelere düşük olduğu yapılmış olan çalışma sonucunda gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak uçucu küllerin pozolanik reaksiyona girmesi için çimentonun hidratasyonu sonucu oluşacak kireci beklemesidir. 28. ve 90. günlerdeki basınç dayanımları incelendiğinde ise %10 uçucu küllü numunelerin kontrol betonuna yakın, bazen ise kontrol betonunun üzerinde değerler verdiği görülmüştür. %30 ve %50 uçucu küllü numunelerin ileri yaşlardaki dayanımlarının ise kontrol betonuna göre düşük olduğu görülmüştür. Basınç dayanımları kür koşullarına göre incelendiğinde 20°C ve 65±5 rutubetli kür koşullarındaki numunelerin 23±2°C su içerisindeki numunelere göre daha düşük mukavemet verdiği görülmektedir. Uçucu kül yerdeğiştirme yüzdesi arttıkça 20°C ve 65±5 rutubetli kür koşullarındaki numunelerin 23±2°C su

içerisindekilere göre daha düşük basınç dayanımları verdiği yani aradaki farkın arttığı görülmüştür.

- Ultrases hızı deneyleri sonuçları incelendiğinde basınç dayanımı ile benzerlik gösterdiği görülmüş, dolayısıyla ultrases hızının artması ile basınç dayanımının artabileceği söylenebilmektedir. Puzolanik reaksiyonun geç başlaması dolayısıyla tüm uçucu küllü numunelerin erken yaşlardaki ultrases hızının kontrol betonuna göre az olduğu gözlemlenmiştir. 28. ve 90. günlerde %10 ve %30 uçucu küllü betonların genellikle kontrol betonuna yakın veya daha fazla ultrases hızına sahip olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni ise betonda boşluk oluşmasına neden olan serbest kirecin uçucu kül tarafından kullanılmasıdır.  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $65\pm 5$  rutubetli kür koşullarındaki numunelerde uçucu külün bu olumlu etkisi  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  su içerisinde saklanmış olan numunelere göre azalmaktadır. %50 uçucu küllü numunelerde ise uçucu külün boşluk miktarı kontrol betonuna göre tüm koşullarda fazla çıkmıştır. Ultrases deneyleri sonucunda uçucu küllü numunelerin daha dolu bir beton üretilmesinde etkili olacağı söylenebilmektedir.

- Basınç dayanımı sonuçlarına göre elde edilen k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde uçucu küllerin erken yaşlardaki etkinliğinin tüm yerleştirme yüzdelerinde az olduğu görülmektedir. İleri yaşlarda ise düşük yüzdeli uçucu kül kullanımının uçucu küllerin etkinliğini arttırdığı görülmüştür. 28. gündeki k etkinlik faktörü değerleri incelendiğinde %10 uçucu küllü numunelerin etkinlikleri su/bağlayıcı madde oranı arttıkça artmakta olduğu saptanmıştır. Ancak aynı değişkenlik 90. günde saptanmamıştır. Diğer uçucu kül yerleştirme yüzdeleri de incelendiğinde ileri yaşlardaki k etkinlik faktörü değerlerinin su/bağlayıcı madde oranına önemsenecek düzeyde bağlı olmadığını göstermektedir. Kür koşulları incelendiğinde ise yüksek uçucu küllü numunelerin etkinliğinin  $20^{\circ}\text{C}$  ve  $65\pm 5$  rutubetli ortamda düştüğü görülmüştür. İleri yaşlarda uçucu kül yüzdesine bağlı olarak değişen k etkinlik faktörü düşünüldüğünün aksine tek bir değer olarak kullanılamamaktadır. Bu nedenle tek bir k etkinlik faktörü değeri yerine yüzdeye bağlı k etkinlik faktörü eğrisi kullanımının daha doğru olacağı görülmüştür. Bu sorunun giderilmesi açısından farklı uçucu kül yerleştirme yüzdeleri için her bir uçucu kül tipinin (C ve F sınıfı) k etkinlik faktörü değerleri araştırılmalı ve belirlenmelidir. Babu ve Rao'nun söylemiş olduğunun aksine k etkinlik faktörü değeri ikiye ayrılırken bir  $k_e$  genel etkinlik faktörü bulmak ise mümkün

olmamaktadır. Elde edilen  $k$  etkinlik faktörü değerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve denenebilmesi için beton üretimi sırasında uçucu külün kısmi ikame metodu ile kullanılması bir gereklilik arz etmektedir.

- Çalışmadan çıkarılan en önemli sonuç, uçucu küllerde sabit  $k$  etkinlik faktörü değeri yerine uçucu kül yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak  $k$  etkinlik faktörü değeri değişiminin saptanmasının daha doğru olduğudur. Bu sonuç, Babu ve Rao'nun çalışmalarından çıkarmış olduğu sonuçları da doğrulamaktadır.

Yapılmış olan bu çalışma sonucunda Çayırhan uçucu küllünün mekanik özellikleri ve  $k$  etkinlik faktörü incelenmiştir. Bu konuda, ileride işlenebilirlik ve durabilite üzerine çalışmalar yapılabilir.  $k$  etkinlik faktörünün daha iyi incelenmesi açısından işlenebilirlik sabit tutularak akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılan çalışmalarla su/bağlayıcı madde oranı daha geniş bir aralıkta incelenebilir. Etkinlik faktörünün belirlenmesinde çimentonun cinsi, dozajı, öngörülen dayanım, agrega boyutu, işlenebilme ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı madde cinsinin uçucu küllerin etkinlik faktörünün değişimine etkisi incelenmelidir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Akman, M.S.**, 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [2] **Kocataşkın, F.**, 1991. Betonun Dünü, Bugünü, Yarını, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, s.1-15.
- [3] **Berry, E.E. and Malhotra, V.M.**, 1986. Fly Ash in Concrete, Ottawa
- [4] **TS EN 450**, 1998. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [5] **Gani, M.S.J.**, 1997. Cement and Concrete, London
- [6] **Ramachandran, V.S.**, 1984. Concrete Admixtures Handbook, New Jersey
- [7] **ASTM C 618**, 1978. Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- [8] **Özturan, T.**, 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, s.280-282.
- [9] **Hodson, V.**, 1990. Concrete Admixtures, New York
- [10] **Manz, O.E., Faber, J.H. and Takagi, H.**, 1989. Worldwide Production of Fly Ash and Utilisation in Concrete, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 1-15.
- [11] **ACI Committee**, 1987. Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, **84**, 381-409.

- [12] **Sivasundaram, V., Carette, G.G. and Malhotra, V.M.,** 1989. Properties of Concrete Incorporating Low Quantity of Cement and High Volumes of Low-Calcium Fly Ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 45-73.
- [13] **Ukita, K., Shigematsu, S. and Ishii, M.,** 1989. Improvements in The Properties of Concrete Utilizing 'Classified Fly Ash', *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 219-240.
- [14] **Haque, M.N., Day, R.L. and Langan B.W.,** 1988. Realistic Strength of Air-Entrained Concretes with without Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **85**, pp.241-247.
- [15] **Olek, J. and Diamond, S.,** 1989. Proportioning of Constant Paste Composition Fly Ash Concrete Mixes, *ACI Materials Journal*, **86**, pp.159-165.
- [16] **Schießl, P., and Härdtl, R.,** 1989. The Change of Mortar Properties as Result of Fly Ash Processing, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 277-294.
- [17] **Atiş, C.D.,** 2000. Heat Evolution and Drying Shrinkage of Concrete Containing High Volume Fly Ash, *Proceedings of Second International Symposium in Cement and Concrete Technology in the 2000's*, İstanbul, Turkey, September 6-10, pp. 359-369.
- [18] **Langley, W.S., Carette, G.G. and Malhotra, V.M.,** 1992. Strength Development and Temperature Rise in Large Concrete Blocks Containing High Volumes of Low-Calcium (ASTM Class F) Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **89**, pp.362-368.
- [19] **Barrow, R.S., Hadchiti, K.M., Carrasquillo, P.M., and Carrasquillo, R.L.,** 1989. Temperature Rise and Durability of Concrete Containing Fly Ash, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 331-347.

- [20] **Giaccio, G., Violini, D., Zappitelli and Zerbino, R.**, 1989. Compressive Strength and Elastic Properties of Fly Ash Concrete Elaborated with Different Cement Types, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 188-202.
- [21] **Mehta, P.K. and Gjrv, O.E.**, 1982. Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, **12**, pp.587-595.
- [22] **Haque, M.N., Langan B.W. and Ward M.A.**, 1984. High Fly Ash Concretes, *ACI Journal*, **81**, pp.54-60.
- [23] **Gopalan, M.K. and Haque, M.N.**, 1987. Effect of Curing Regime on the Properties of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, **84**, pp.14-19.
- [24] **Brooks, J.J. and Farrugia, R.**, 1989. Early-Age Load Deformations of PFA Concrete, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 237-251.
- [25] **Sarıçimen, H., Maslehuddin, M., Al-Tayyib, A.J. and Al-Mana, A.I.**, 1995. Permeability and Durability of Plain and Blended Cement Concretes Cured in Field and Laboratory Conditions, *ACI Materials Journal*, **92**, pp.111-116.
- [26] **Zang, M., Bilodeau, A, Malhotra, V.M., V.M., Kim, K. And Kim, J.C.**, 1999. Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials: Effect on Compressive Strength and Resistance to Chloride-Ion Penetration, *ACI Materials Journal*, **96**, pp.181-189.
- [27] **Mangat, P.S. and Khatib, J.M.**, 1995. Influence of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, **92**, pp.542-552.
- [28] **Tikal'sky, P.J. and Carrasquillo, R.L.**, 1992. Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, pp.69-75.

- [29] **Fidjestol, P.**, 1989. Durability of Silica Fume and Fly Ash Concretes Exposed to Organic Acids, *Supplementary Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 459-485.
- [30] **Kobayashi, S., Hozumi, Y., Nakano, T. and Yanagida, T.**, 1989. Study on the Effect of the Quality of Fly Ash for Controlling Alkali – Aggregate Reactions, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 403-416.
- [31] **Lee, C.**, 1989. Effects of Alkalies in Class C Fly Ash on Alkali – Aggregate Reaction, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 417-430.
- [32] **Onabolu, O.A.**, 1989. Some Properties of Crude Oil-Soaked Concrete – I.Exposure at Ambient Temperature, *ACI Materials Journal*, **86**, pp.150-158.
- [33] **Malhotra, V.M., Zang, M.H. and Leaman, G.H.**, 2000. Long-Term Performance of Steel Reinforcing Bars in Portland Cement Concrete Incorporating Moderate and High Volumes of ASTM Class F Fly Ash, *ACI Materials Journal*, **97**, pp.409-417.
- [34] **Kokubu, M. and Nagataki, S.**, 1989. Carbonation of Concrete with Fly Ash and Corrosion of Reinforcements in 20 Years Tests, *Proceedings of Third International Conferences on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Pozzolans in Concrete Volume 1*, Trondheim, Norway, pp. 315-329.
- [35] **Pekmezci, B.Y. ve Uyan, M.**, 2001. Uçucu Küllerde Etkinlik Faktörü Kavramı, *Hazır Beton*, Mayıs-Haziran 2001, s.65-68.
- [36] **Smith, I.A.**, 1967. The Design of Fly Ash Concretes, *Proc Inst Civil Engineers*, London, pp.769-790.
- [37] **Akman, S.M. and Yücel, K.T.**, 1995. Efficiency Factors of Turkish C Class Fly Ashes, *Türkiye Hazır Beton Birliği XI. Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 1995.

- [38] **Güler, H.**, 1994.Uçucu Küllü Betonlarda Bağlayıcı Dozajı ve Bileşiminin Geçirirnililiğe Etkisi, *Lisans Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- [39] **Özcan M.**, 1997. Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayısının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] **Babu, K.G., and Rao, G.S.N.**, 1993. Efficiency of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Composites*, **15**, pp.223-229.

## **ÖZGEÇMİŞ**

3 Mayıs 1976 yılında Kilis'te doğan Cem Salih TUYGUN, ilköğrenimini Kilis Cumhuriyet İlkokulunda, orta öğrenimini Gaziantep Anadolu Lisesinde yaptı. 1994 yılında öğrenimine başladığı İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1999 yılında mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. bilim sınavını kazandı ve İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendiliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Kendisi halen Yapı Malzemesi Anabilim Dalında öğrenim görmektedir.