

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALSİT KATKILI BETONLARIN  
ERKEN YAŞ MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Yusuf Egemen KESLER**

**Anabilim Dalı : İnşaat Mühendisliği**

**Programı : Yapı Mühendisliği**

**HAZİRAN 2009**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALSİT KATKILI BETONLARIN  
ERKEN YAŞ MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Yusuf Egemen KESLER  
(501061133)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Haziran 2009**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA (İTÜ)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İTÜ)  
Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)**

**HAZİRAN 2009**



## ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle bana her konuda yardımcı olan çok değerli tez hocam sayın Doç. Dr. Yılmaz AKKAYA'ya,

Tüm eğitim-öğretim hayatım boyunca beni maddi manevi destekleyen annem Nurcan KESLER, babam Kamil KESLER ve kardeşim Yekta Cemil KESLER'e,

Tezimin başından sonuna kadar tüm adımlarında büyük desteğini gördüğüm değerli dostum İnş. Müh. Mustafa AKIN'a,

Deneyisel çalışmalarım süresince ellerinden gelen tüm çabayı göstererek bana yardımcı olan çok değerli İ.T.Ü. Marmaray Yapı Malzemesi Laboratuvarı ve İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına,

Yoğun çalışma ortamlarında bana zaman ayırarak deneyisel çalışmamın değerlendirilip yorumlanmasında yardımlarını benden esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım İnş. Müh. Ahmet ŞİNİKOĞLU, İnş. Yük. Müh. Arda KİREMİTÇİ, İnş. Yük. Müh. Aslı ÖZBORA ve İnş. Yük. Müh. Yuşa ŞAHİN'e,

Verdikleri destek ve gösterdikleri üstün sabır için teşekkür ederim.

Mayıs 2009

Yusuf Egemen KESLER  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

|                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                                                  | iii       |
| İÇİNDEKİLER.....                                                            | v         |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                        | vii       |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                          | ix        |
| ÖZET.....                                                                   | xi        |
| SUMMARY.....                                                                | xiii      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                                                       | <b>1</b>  |
| <b>2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER.....</b>                        | <b>3</b>  |
| 2.1 Puzolanların Tanımlanması ve Sınıflandırılması .....                    | 3         |
| 2.2 Puzolanik Reaksiyon .....                                               | 4         |
| 2.3 Uçucu Küller .....                                                      | 6         |
| 2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri.....                                       | 6         |
| 2.3.1.1. Uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik özellikleri.....            | 6         |
| 2.3.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri.....                           | 8         |
| 2.3.2 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi.....                   | 10        |
| 2.3.2.1. İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme.....                           | 10        |
| 2.3.2.2. Priz süresi .....                                                  | 12        |
| 2.3.2.3. Hidratasyon ısısı.....                                             | 12        |
| 2.3.2.4. Hava sürüklenme.....                                               | 13        |
| 2.3.3 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi .....            | 14        |
| 2.3.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemetleri .....           | 14        |
| 2.3.3.2. Elastisite modülü.....                                             | 16        |
| 2.4 Silis Dumanı.....                                                       | 17        |
| 2.4.1 Silis dumanının özellikleri .....                                     | 18        |
| 2.4.1.1. Silis dumanının kimyasal özellikleri.....                          | 18        |
| 2.4.1.2. Silis dumanının fiziksel özellikleri.....                          | 19        |
| 2.4.2 Silis dumanının taze beton özelliklerine etkisi.....                  | 20        |
| 2.4.2.1. İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme.....                           | 20        |
| 2.4.2.2. Priz süresi .....                                                  | 21        |
| 2.4.2.3. Hidratasyon ısısı.....                                             | 22        |
| 2.4.2.4. Hava sürüklenme.....                                               | 22        |
| 2.4.3 Silis dumanının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi .....           | 22        |
| 2.4.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemeti .....              | 22        |
| 2.4.3.2. Elastisite modülü.....                                             | 25        |
| 2.5 Kalsit .....                                                            | 26        |
| 2.5.1 Türkiye'deki kalsit oluşumları .....                                  | 27        |
| 2.5.2 Mikronize öğütülmüş kalsitin inşaat sektöründe tüketim alanları ..... | 28        |
| 2.5.3 Kalsitin üretim yöntemi ve teknolojisi.....                           | 28        |
| 2.5.4 Kalsitin beton özelliklerine etkileri.....                            | 29        |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>                                            | <b>35</b> |
| 3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler.....                                      | 35        |
| 3.1.1 Çimento .....                                                         | 35        |

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2 Agregalar .....                                                        | 36        |
| 3.1.3 Uçucu kül .....                                                        | 36        |
| 3.1.4 Silis dumanı.....                                                      | 38        |
| 3.1.5 Kalsit .....                                                           | 38        |
| 3.1.6 Karışım suyu .....                                                     | 39        |
| 3.1.7 Katkı maddeleri .....                                                  | 40        |
| 3.1.7.1. Yeni ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı .....        | 40        |
| 3.1.7.2. Hava sürükleyici beton katkısı .....                                | 40        |
| 3.2 Beton Karışımları ve Numune Kodları .....                                | 41        |
| 3.3 Üretimde İzlenen Sıra.....                                               | 42        |
| 3.4 Yapılan Deneyler.....                                                    | 43        |
| 3.4.1 Taze beton deneyleri .....                                             | 43        |
| 3.4.2 Basıç dayanımı , yarma dayanımı ve elastisite modülü gelişimi .....    | 43        |
| 3.4.3 Kırılma enerjisinin belirlenmesi.....                                  | 43        |
| 3.4.4 Priz süresinin belirlenmesi .....                                      | 44        |
| 3.4.5 Yarı adyabatik sıcaklık değişiminin belirlenmesi .....                 | 45        |
| 3.4.6 Çökme, yayılma, taze birim ağırlık ve hava kaybının belirlenmesi.....  | 46        |
| 3.4.7 Kısıtlanmış rötre deneyi – halka testi.....                            | 46        |
| 3.5 Kür Programı.....                                                        | 48        |
| <b>4. DENEY SONUÇLARI.....</b>                                               | <b>49</b> |
| 4.1 Taze Beton Deney Sonuçları.....                                          | 49        |
| 4.1.1 Çökme deneyi.....                                                      | 49        |
| 4.1.2 Yayılma tablası deneyi .....                                           | 49        |
| 4.1.3 Birim ağırlık deneyi .....                                             | 49        |
| 4.1.4 Hava içeriği deneyi.....                                               | 50        |
| 4.2 Mekanik Deney Sonuçları .....                                            | 50        |
| 4.2.1 Basıç dayanımı gelişimi .....                                          | 50        |
| 4.2.2 Yarma dayanımı gelişimi .....                                          | 51        |
| 4.2.3 Elastisite modülü gelişimi .....                                       | 52        |
| 4.3 Kırılma Enerjisi .....                                                   | 54        |
| 4.4 Priz Süresinin Belirlenmesi .....                                        | 55        |
| 4.5 Yarı Adyabatik Sıcaklık Değişimi .....                                   | 56        |
| 4.6 Çökme, Yayılma, Birim Ağırlık ve Hava İçeriği Kaybının Belirlenmesi..... | 57        |
| 4.7 Kısıtlanmış Rötre Deneyi – Halka Testi .....                             | 60        |
| 4.8 Kırılma Enerjisi-Basınc Dayanımı .....                                   | 61        |
| 4.9 Net Eğilme Dayanımı-Basınc Dayanımı .....                                | 61        |
| 4.10 7./28. Gün Basınc Dayanımı Gelişimi .....                               | 62        |
| 4.11 Ec-Basınc Dayanımı ve Ec-Yarma Dayanımı Gelişimi .....                  | 63        |
| <b>5. GENEL SONUÇLAR .....</b>                                               | <b>65</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                        | <b>69</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                            | <b>77</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                         | <b>97</b> |

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Çizelge 2.1:</b> F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve portland çimentosunun kimyasal özellikleri. ....                         | 8  |
| <b>Çizelge 2.2:</b> Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (% olarak). ....                                                           | 19 |
| <b>Çizelge 2.3:</b> Silis dumanının pozolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının uçucu kül ve doğal pozolan ile karşılaştırılması. .... | 20 |
| <b>Çizelge 2.4:</b> Mikronize kalsitin kimyasal özellikleri. ....                                                                    | 27 |
| <b>Çizelge 2.5:</b> 300 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri. ....                                                              | 31 |
| <b>Çizelge 2.6:</b> 350 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri. ....                                                              | 31 |
| <b>Çizelge 3.1:</b> Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri. ....                                                              | 35 |
| <b>Çizelge 3.2:</b> Agregaların fiziksel özellikleri. ....                                                                           | 36 |
| <b>Çizelge 3.3:</b> Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler. ....                                                             | 37 |
| <b>Çizelge 3.4:</b> Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri. ....                                                         | 38 |
| <b>Çizelge 3.5:</b> Üretimlerde kullanılan kalsitin kimyasal özellikleri. ....                                                       | 38 |
| <b>Çizelge 3.6:</b> Üretimlerde kullanılan kalsitin elek analiz değerleri. ....                                                      | 39 |
| <b>Çizelge 3.7:</b> Kullanılan süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri. ....                                                     | 40 |
| <b>Çizelge 3.8:</b> Kullanılan hava sürükleyici beton katkısının teknik özellikleri. ....                                            | 41 |
| <b>Çizelge 3.9:</b> Numune kodları ve açıklaması. ....                                                                               | 41 |
| <b>Çizelge 3.10:</b> Beton karışım dizaynı (1m <sup>3</sup> için gerekli malzeme miktarı). ....                                      | 42 |
| <b>Çizelge 4.1:</b> Taze beton deneylerinden elde edilen sonuçlar. ....                                                              | 50 |
| <b>Çizelge 4.2:</b> K20 numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği. ....                                                 | 58 |
| <b>Çizelge 4.3:</b> UK numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği. ....                                                  | 58 |
| <b>Çizelge 4.4:</b> K20-K5 numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği. ....                                              | 59 |
| <b>Çizelge 4.5:</b> UK-SD numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği. ....                                               | 59 |
| <b>Çizelge A.1:</b> Agregaların tane boyutu dağılımı. ....                                                                           | 77 |
| <b>Çizelge A.2:</b> K20 betonu basınç dayanımı değerleri. ....                                                                       | 78 |
| <b>Çizelge A.3:</b> K20 betonu yarma dayanımı değerleri. ....                                                                        | 79 |
| <b>Çizelge A.4:</b> K20 betonu elastisite modülü değerleri. ....                                                                     | 80 |
| <b>Çizelge A.5:</b> UK betonu basınç dayanımı değerleri. ....                                                                        | 81 |
| <b>Çizelge A.6:</b> UK betonu yarma dayanımı değerleri. ....                                                                         | 82 |
| <b>Çizelge A.7:</b> UK betonu elastisite modülü değerleri. ....                                                                      | 83 |
| <b>Çizelge A.8:</b> K20-K5 betonu basınç dayanımı değerleri. ....                                                                    | 84 |
| <b>Çizelge A.9:</b> K20-K5 betonu yarma dayanımı değerleri. ....                                                                     | 85 |
| <b>Çizelge A.10:</b> K20-K5 betonu elastisite modülü değerleri. ....                                                                 | 86 |
| <b>Çizelge A.11:</b> UK-SD betonu basınç dayanımı değerleri. ....                                                                    | 87 |
| <b>Çizelge A.12:</b> UK-SD betonu yarma dayanımı değerleri. ....                                                                     | 88 |
| <b>Çizelge A.13:</b> UK-SD betonu elastisite modülü değerleri. ....                                                                  | 89 |
| <b>Çizelge A.14:</b> Kırılma enerjisi değerleri. ....                                                                                | 89 |
| <b>Çizelge A.15:</b> Net eğilme dayanımı değerleri. ....                                                                             | 89 |
| <b>Çizelge A.16:</b> Halka testi değerleri. ....                                                                                     | 90 |
| <b>Çizelge A.17:</b> Priz başlangıç ve bitiş süreleri. ....                                                                          | 90 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1: Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı değişimi.....                          | 5  |
| Şekil 2.2: 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 ..... | 9  |
| Şekil 2.3: Uçucu küllü ve kontrol betonları için basınç dayanımı-zaman grafiği .....                                                                                                  | 16 |
| Şekil 2.4: Silis dumanı katkı yüzdesinin beton dayanımına etkisi .....                                                                                                                | 23 |
| Şekil 2.5: Silis dumanı katkısının beton basınç dayanımına etkisi.....                                                                                                                | 24 |
| Şekil 3.1: Agregaların tane boyutu dağılımı granülometrisi .....                                                                                                                      | 36 |
| Şekil 3.2: Üretimlerde kullanılan 20 µm' luk kalsitin elek analizi.....                                                                                                               | 39 |
| Şekil 3.3: Üretimlerde kullanılan 5 µm' luk kalsitin elek analizi.....                                                                                                                | 39 |
| Şekil 3.4: Üç noktalı eğilme deney düzeneği. ....                                                                                                                                     | 43 |
| Şekil 3.5: Örnek yük-sehim eğrisi. ....                                                                                                                                               | 44 |
| Şekil 3.6: Priz süresi tayini deney düzeneği. ....                                                                                                                                    | 45 |
| Şekil 3.7: Yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi.....                                                                                                             | 46 |
| Şekil 3.8: Halka testi deney düzeneği.....                                                                                                                                            | 47 |
| Şekil 3.9: Beton halka ile çelik halka arasındaki gerilmeler. ....                                                                                                                    | 48 |
| Şekil 4.1: Karşılaştırmalı basınç dayanımı grafiği. ....                                                                                                                              | 51 |
| Şekil 4.2: Karşılaştırmalı yarma dayanımı grafiği.....                                                                                                                                | 52 |
| Şekil 4.3: Karşılaştırmalı Eo grafiği. ....                                                                                                                                           | 53 |
| Şekil 4.4: Karşılaştırmalı Ec grafiği. ....                                                                                                                                           | 53 |
| Şekil 4.5: Karşılaştırmalı kırılma enerjisi grafiği. ....                                                                                                                             | 54 |
| Şekil 4.6: Karşılaştırmalı net eğilme dayanımı grafiği. ....                                                                                                                          | 55 |
| Şekil 4.7: Karşılaştırmalı priz başlangıcı ve priz sonu grafiği. ....                                                                                                                 | 55 |
| Şekil 4.8: Yığışımly yarı adyabatik deney grafiği. ....                                                                                                                               | 56 |
| Şekil 4.9: Karşılaştırmalı yarı adyabatik sıcaklık değişimi grafiği.....                                                                                                              | 57 |
| Şekil 4.10: Birim ağırlık artış grafiği.....                                                                                                                                          | 59 |
| Şekil 4.11: Halka testi çatlak günü grafiği. ....                                                                                                                                     | 60 |
| Şekil 4.12: Çatlak günü-kırılma enerjisi grafiği. ....                                                                                                                                | 60 |
| Şekil 4.13: Kırılma enerjisi-basınç dayanımı karşılaştırması. ....                                                                                                                    | 61 |
| Şekil 4.14: Net eğilme dayanımı-basınç dayanımı karşılaştırması.....                                                                                                                  | 62 |
| Şekil 4.15: 7./28. gün basınç dayanımı gelişimi karşılaştırması.....                                                                                                                  | 63 |
| Şekil 4.16: Ec-Basınç dayanımı gelişimi karşılaştırması. ....                                                                                                                         | 63 |
| Şekil A.1: Tüm numunelerin 1 günlük yük-sehim grafiği.....                                                                                                                            | 90 |
| Şekil A.2: Tüm numunelerin 3 günlük yük-sehim grafiği.....                                                                                                                            | 91 |
| Şekil A.3: Tüm numunelerin 7 günlük yük-sehim grafiği.....                                                                                                                            | 91 |
| Şekil A.4: Tüm numunelerin 28 günlük yük-sehim grafiği.....                                                                                                                           | 92 |
| Şekil A.5: K20 numunesi yük-sehim grafiği. ....                                                                                                                                       | 92 |
| Şekil A.6: UK numunesi yük-sehim grafiği. ....                                                                                                                                        | 93 |
| Şekil A.7: K20-K5 numunesi yük-sehim grafiği.....                                                                                                                                     | 93 |
| Şekil A.8: UK-SD numunesi yük-sehim grafiği.....                                                                                                                                      | 94 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil A.9:</b> Basınç deneyi numunesi. ....             | 94 |
| <b>Şekil A.10:</b> Yarma deneyi numunesi. ....             | 95 |
| <b>Şekil A.11:</b> Elastisite modülü deneyi numunesi. .... | 95 |
| <b>Şekil A.12:</b> Priz süresi deney numunesi. ....        | 96 |
| <b>Şekil A.13:</b> Halka deneyi numunesi. ....             | 96 |

## KALSİT KATKILI BETONLARIN ERKEN YAŞ MEKANİK ÖZELLİKLERİ

### ÖZET

Kalsit katkısının betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek için yapılan bu çalışmada dört farklı beton karışımı yapılmıştır. Farklı inceliklere sahip 20 mikronluk ve 5 mikronluk iki kalsit kullanılmıştır. 20 mikronluk kalsit uçucu külle, 5 mikronluk kalsit silis dumanıyla eş değer hacimde yer değiştirilerek oluşturulan bu karışımlarda dayanım gelişimi, kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı, priz süresi tayini, yarı adyabatik sıcaklık, halka testi ve çökme kaybı deneyleri yapılmıştır.

Dört farklı karışım; i) yalnız 20 mikron kalsitli, ii) yalnız uçucu küllü, iii) 20 mikron ve 5 mikron kalsitli ve iii) uçucu kül ve silis dumanlı olmak üzere üretilmiştir. Yalnız 20 mikron kalsitli ve yalnız uçucu küllü karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.40 seçilmiş ve aynı tip katkıları kullanılarak üretim yapılmıştır. 20 ve 5 mikronluk kalsitin birlikte kullanıldığı ve uçucu külle silis dumanının birlikte kullanıldığı karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.38 seçilmiş ve aynı tip katkıları kullanılarak üretim yapılmıştır. Çökme, yayılma ve hava içeriği tüm betonlarda sabit tutulmuştur.

Dayanım gelişiminde erken yaşlarda kalsit içeren betonlar daha yüksek basınç dayanımına sahipken, 7. günde tüm betonlarda yakın basınç dayanımı değerleri görülmüştür. Tüm betonlar 7. günde hesaplanan dayanım değerlerine ulaşmışlardır. Dayanımlar arasındaki gelişim farkı 7 ile 28. gün arasında daha belirgin hale gelmiş ve en yüksek basınç dayanımını uçucu külle silis dumanını birlikte kullandığımız beton vermiştir. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte kullandığımız beton hariç diğer betonlar birbirlerine yakın elastisite modülü değeri verirken, uçucu kül ve silis dumanlı beton ortalama %17 daha yüksek değer vermiştir.

Kırılma enerjisinde tüm numunelerde 3. günden sonra azalma görülmüştür. 28 gün sonunda en yüksek enerjiye uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren numune ulaşmıştır. Net eğilme dayanımında 28 gün sonunda en yüksek dayanıma uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren numune ulaşmıştır. Kalsit içeren betonlar 7. günde 28. gün dayanımlarının ortalama %93'üne ulaşmışlardır. Bu oran uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlar için %80'de kalmıştır.

Kalsit katkılı betonlarda diğer betonlara göre daha erken priz başlangıcı ve sonu görülmüştür. 20 mikron kalsit içeren betonda, hem 20 mikron hem de 5 mikron kalsit içeren numuneden daha erken priz başlangıcı ve sonu görülmüştür. Beton içindeki malzemenin inceliği ne kadar artarsa priz başlangıç ve bitiş süresinin o kadar uzadığı sonucuna varılmıştır.

Sadece uçucu kül içeren betonda çökme ve yayılma kaybı görülmemiştir. Diğer betonlarda belirli miktarda kayıplar olmuştur. Çökme ve yayılma kaybında kullanılan akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıları önemli bir etkidir. Kalsit katkılı beton üretiminde bu katkıların kalsitle uyumu ön üretimlerle denenmelidir.

Tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla kırılma enerjisinde azalma görülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte kullandığımız betonda düşüş daha

az olmuştur. Yalnız 20 mikron kalsit ve yalnız uçucu kül içeren betonlarda 1. günden 3. güne geçişte artış gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla net eğilme dayanımında da artış görülmüştür.

Sonuç olarak kalsit kullanılan betonlarda istenilen dayanımlara ulaşmakta ancak 7. günden sonra dayanım artışı uçucu kül veya silis dumanı katkılı betonlara oranla daha az olmaktadır. Ayrıca kalsitin priz süresini hızlandığı da görülmüştür. Bu betonlarda çökme ve yayılma kaybını en aza indirmek için uygun katkı tipini bulmak için ön deneyler yapılmalıdır.

## **EARLY AGE MECHANICAL PROPERTIES OF CALCITE ADDED CONCRETE**

### **SUMMARY**

The effect of calcite addition on the early age properties of high performance concrete is studied. Two calcite types of 20 micron and 5 micron fineness have been used. The performance of the calcite added concrete is compared to the concrete with fly ash and silica fume. A total of 4 mixtures have been investigated and strength development, fracture energy, flexural strength, stiffening time, semi-adiabatic heat, ring and slump loss tests are applied.

Four different types of mixtures are produced with i) only 20 micron calcite, ii) only fly ash, iii) combination of 20 and 5 micron calcites and iv) combination of fly ash and silica fume. The water/binder ratio of the mixtures were 0,38-0,40. Superplasticizers were used to maintain similar workability. Slump, flow and air content of the mixtures were kept constant.

For strength development at early ages calcite added mixtures provided higher compressive strength but at 7<sup>th</sup> day all mixtures had almost same values. All mixtures reached their design strength at 7<sup>th</sup> day. Difference between strength development became more distinct between 7<sup>th</sup> and 28<sup>th</sup> days, the mixtures that have fly ash and silica fume provided the highest compressive strength. For modulus of elasticity, all mixtures approximately had similar values but only the mixture with fly ash and silica fume had higher values than other mixtures.

Fracture energy of the mixtures declined after 3<sup>rd</sup> day. As the samples matured, both the strength and the brittleness decreased. After 28<sup>th</sup> day later the mixture, with fly ash and silica fume, had the highest fracture energy value. It also had the highest value for flexural strength. The mixtures that have calcite reached 93% of their 28<sup>th</sup> day strength at 7<sup>th</sup> day. This ratio is 80% for fly ash and silica fume added mixtures.

Calcite added mixtures had lower initial and final stiffening time compared to fly ash and silica fume added mixtures, and also 20 micron calcite added concrete had lower initial and final stiffening time than 20 and 5 micron calcite added concrete.

No slump or flow loss was observed for the mixture that only has fly ash. For other mixtures there was slump and flow loss at different values. At slump and flow loss the type of admixture is one of the effective factors. While using calcite in concrete, compatibility of the chemical admixtures with calcite should be tested.

For all mixtures fracture energy decreases with the increase of compressive strength. An increase was observed only for the mixtures that have 20 micron calcite and fly ash from 1<sup>st</sup> day to 3<sup>rd</sup> day. Also flexural strength increased with the increase of compressive strength for all mixtures.

As a result, the calcite added concrete mixtures reached the designed compressive strength at 7<sup>th</sup> day but the increase at compressive strength wasn't high compared to fly ash or silica fume added concretes. Calcite accelerated the stiffening time. Since

the calcite addition resulted in slump and flow loss, compatibility of the admixtures should be tested before production.

## 1. GİRİŞ

Yıllardan beri inşaat sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan bir yapı malzemesi olan betonun davranışını ortaya koyabilmek ve özelliklerini iyileştirebilmek için yapılan çalışmalar tüm hızıyla sürmektedir. Genel anlamda beton; agregâ, çimento ve suyun belirli bir oranda karıştırılmasıyla elde edilir. Çimentonun bulunmasıyla daha da yoğunlaşan araştırmalar betonun mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek için bünyesine yeni malzemeler katmak, değişik katkı maddeleri eklemek suretiyle günümüzde de devam etmektedir. Betonun işlenebilirliğinin ve mukavemetinin artması, dış etkenlere karşı daha dayanıklı olması için kimyasal katkıları ve bağlayıcı atıkların kullanılması beton teknolojisinde son yapılan çalışmalardandır.

Sanayinin ilerlemesiyle fabrikaların oluşturduğu çevreye zararlı atıklar, beton sektöründe kullanılmaya başlanarak beton özelliklerinde hem durabilite açısından hem de mekanik özellikler açısından iyileşmeler sağlanmasına yardımcı olmuştur. Bu sanayi atıklarından sıkça kullanılanlarından iki tanesi uçucu kül ve silis dumanıdır.

Betonda termik santrallerden elde edilen uçucu kül ve elektronik endüstrisinden elde edilen silis dumanı kullanımı, maliyeti yüksek olan portland çimentosundan tasarruf sağlanmasına yardım ederken betonun taze ve sertleşmiş haldeki performansını da arttırmaktadır. Uçucu kül ve silis dumanı katkısı taze betonda hidratasyon ısısını düşürmekte, işlenebilirliği arttırmakta, terleme ve kusmayı azaltmakta ve pompalanabilirliği arttırmaktadır, sertleşmiş betonda ise uzun vadede mekanik dayanıma ve durabiliteye olumlu katkıda bulunabilmektedir. Ancak sıklıkla kullanılabilir hale gelmeleri uçucu kül ve silis dumanı maliyetlerini de arttırmıştır ve araştırmacıları onlardan daha ucuz doğal kaynaklara yöneltmiştir.

Kireğin bir formasyonu olan kalsit yapısında %95-97 oranında  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) bulunan bir malzemedir. Mineral karbonatlı kayaların ana minerali olan kalsit; kireç taşında, kalkerde ve mermerde bulunur. Doğada sıkça bulunması sebebiyle ulaşılması ve işlenebilmesi kolay bir malzemedir. Kalsit günümüzde kağıt, boya, plastik, seramik ve inşaat sektöründe kullanılmaktadır. İnşaat sektöründeki

kullanımı genelde sıva, macun ve derz dolgusu üretimi şeklindedir. Beton sektörü için yeni bir malzeme olarak sayılabilecek olan kalsit üzerine yapılan çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda kalsitin betonun erken yaş mekanik özelliklerine etkisini incelemek amaçlanmıştır. Uçucu kül ile 20 mikron inceliğindeki kalsit, silis dumanıyla 5 mikron inceliğinde kalsit eş değer hacim esasına dayanarak yer değiştirilmiş ve bu değişimin beton özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Dayanım gelişimlerini izlemek için 0.5, 1., 3., 7. ve 28. günlerde basınç dayanımı, yarma dayanımı ve elastisite modülü deneyleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Kırılma enerjilerini ve eğilme dayanımlarını belirlemek üzere 1., 3., 7. ve 28. günlerde RILEM 50-FMC'ye göre deneyler yapılmış ve sonuçlar hem basınç dayanımı gelişimiyle hem de kendi içinde karşılaştırılmış ve analizler yapılmıştır.

Betonun çatlak potansiyelini belirleyebilmek için halka testi yapılmış ve farklı beton karışımlarına sahip beton numunelerin çatlak potansiyeli belirlenmiştir. Daha sonra bu potansiyel RILEM kırılma enerjisiyle karşılaştırılarak analizler yapılmıştır.

Ayrıca kalsitin priz süresi, çökme kaybı, yayılma kaybı ve yarı adyabatik sıcaklık değerlerine etkisi incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında kalsitin betonun erken yaş mekanik özelliklerine etkisi belirlenmiştir.

## 2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER

### 2.1 Puzolanların Tanımlanması ve Sınıflandırılması

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 [1].

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 katkılar olarak adlandırılmalarına neden olmuştur [2].

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 [3]. 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, bakar, çelik, kurşun, nikel, silikon ve fenosilikon 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 kullanılabilir. Mineral katkıların sınıflandırılması, aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir [2,4]:

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

## 2.2 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  $Ca(OH)_2$ 'e ihtiyaç duyarlar. Portland çimentosu ve puzolanlar için bu denklemler şöyledir [5]:



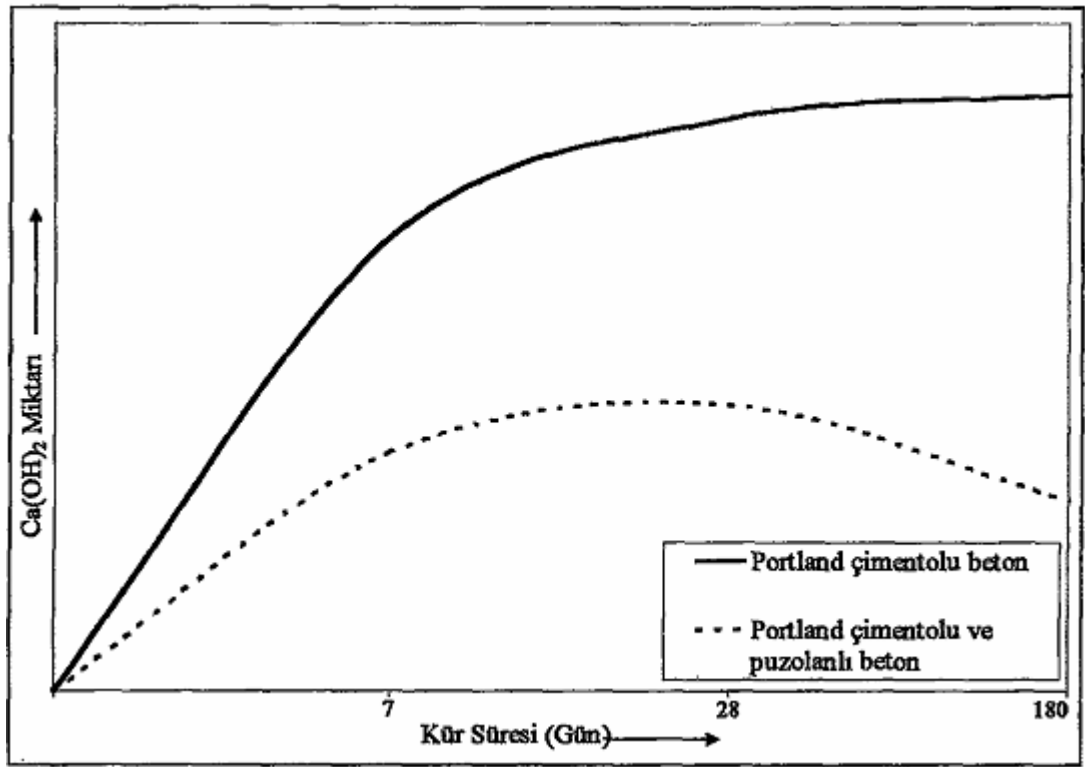
(Portland çimentosu hidratasyonu)



(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 [5]. Portland çimentosu içerisinde bulunan  $C_2S$  ve  $C_3S$ , hidrasyon sonucu çok miktarda  $Ca(OH)_2$  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 2.1'de gösterilmiştir [4-6].



**Şekil 2.1:** Portland çimentolu beton karışımı ile portland çimentosu ve puzolanlı beton karışımının hidrasyonda serbest bıraktığı kireç miktarı değişimi [4].

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 [4,6].

## **2.3 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 kıl, 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 [2]. 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 [7].

Uçucu küller, ilk olarak 1930 yılında elektrik enerjisi endüstrisinde keşfedilmiştir. 1937 yılında, Kuzey Amerika'da, Kaliforniya Üniversitesi'nde, RE.Davis tarafından beton içerisinde kullanılarak, ilk deneysel sonuçlar elde edilmiştir. 1948 yılında, Hungry Horse barajı inşaatında kullanımı ile inşaat teknolojisindeki kullanımı başlamıştır [8,9].

### **2.3.1 Uçucu küllerin özellikleri**

#### **2.3.1.1. Uçucu küllerin kimyasal ve minerolojik 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 [10].

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 özelliği gösterirler [10].

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 CaO içermesidir. CaO oranı %10 ve üzerinde olan küller yüksek kireçli, %10'nun altında CaO içeren küller ise düşük kireçli uçucu kül olarak adlandırılmaktadır [10]. Çizelge 2.1'de C ve F sınıfı uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine örnek verilmiştir [5].

**Çizelge 2.1:** F ve C sınıfı uçucu kül örneklerinin ve portland çimentosunun kimyasal özellikleri [5].

| 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 [7].

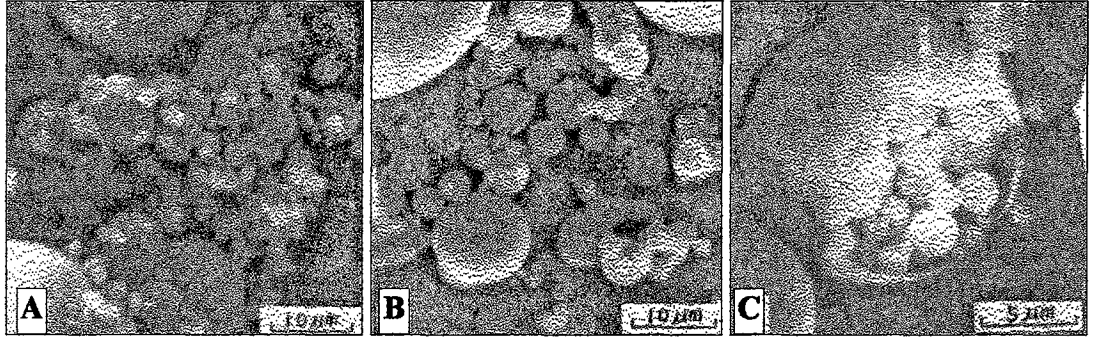
#### 2.3.1.2. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri

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 [10].

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 [10].

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 [10]. Şekil 2.2'de C ve F sınıfı uçucu küller ve kırılmış bir plerosfer için mikro fotoğraflar görülmektedir [3].



**Şekil 2.2:** 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 [3].

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 [10].

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>) [10].

## 2.3.2 Uçucu küllerin taze beton özelliklerine etkisi

### 2.3.2.1. İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme

Taze betonun donatılı kalıplar içerisine rahat bir şekilde yerleşmesi için karışımın akıcı olması, yani işlenebilirliğin iyi olması gerekmektedir. Beton içerisinde çimentonun hidrasyonu 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 [6,9].

Owens'in çalışmaları, uçucu küle 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 [8].

Sivasundaram, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küllerle basit ikame metodu ile yüksek oranlarda beton içerisinde kullanarak deneyler yapmışlar, elde edilen sonuçlara göre uçucu küllerin işlenebilirliği arttırdığını ve su ihtiyacını azalttığını söylemişlerdir [9,11].

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 [12].

Haq, 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 [13]. Yalnızca hava sürükleyici kullanılarak üretilen betonlara göre uçucu kül kullanımının işlenebilirliği arttırdığı, Samarin ve Ryan'ın 1975 yılında yaptığı çalışmalarda belirtilmektedir [8].

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 [14].

SchieBl ve Hårdtl, 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 [15].

Neville, agrega şekillerinin yuvarlıklarının artmasıyla işlenebilirliğinin arttığını ifade etmiştir. Ayrıca, uçucu külün işlenebilirlik üzerine olan etkisi, uçucu kül ve çimento arasındaki özgül ağırlıkların farklarına da dayanmaktadır. Uçucu külün özgül ağırlığının normal portland çimentosundan daha düşük olması nedeni ile ağırlık bazında değişimi, taze betonun işlenebilirliğine hakim olan betondaki yapıştırıcı hamur miktarını yükseltmektedir [9,16].

Hassan ve ark., beton karışımında çimentonun her %10'nun uçucu kül ile yer değiştirilmesi, su ihtiyacını %3-4 oranında azalttığını belirtmektedirler. Böylece boşluk oranının önemli derecede azaldığını vurgulamaktadırlar [17].

Uçucu küllü betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır. Uçucu külün yoğunluğunun portland çimentosunun yoğunluğundan daha az olması nedeniyle, çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega tanelerinin arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır. Ayrıca uçucu kül tanelerinin küresel şekilli olması, iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını artırmaktadır [18].

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 [6,8].

Copeland, terleme konusunda yaptığı çalışmalarda, terlemeye eğilimli kaba karışımlarda uçucu kül kullanımının terlemede azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir [8]. Sivasundaram, Carette ve Malhotra, yüksek miktarda uçucu kül kullanarak ürettiği betonlarda hiç terlemeye rastlamadıklarını belirtmişlerdir [11]. Ukita, Shigematsu ve Ishii ise inceliği fazla olan uçucu küllerle yaptıkları çalışmada yine uçucu küllerin terlemeyi ve segregasyonu azalttığını söylemişlerdir [9,12].

### **2.3.2.2. Priz süresi**

Sivasundaram, Carrette ve Malhotra, yüksek uçucu kül kullanımı ile priz süresinin arttığını söylemişlerdir [11]. 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 birleşiminin bunda etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, çimentonun inceliği, hamurun su miktarı ve ortam sıcaklığının etkisinin daha fazla olduğunu söylemişlerdir [8].

Wooley ve Cabrera, PÇ'na %30 oranında katılan uçucu külün priz süresini yaklaşık olarak 2 saat arttırabildiğini belirtmişlerdir [19].

Yeğınobalı, çimentoya %40 oranına kadar katılan uçucu küller priz süresini uzatırken, %8 oranına kadar kül yerine silis dumanı katılması ile priz süresinde 25-30 dakikalık kısaltmalar sağlanabilmekte, uçucu kül katkısı hamurlarda hacim genişlemesini biraz artırmakta, ancak silis dumanı ilavesi ile bu artış biraz önlenebilmektedir [9,20].

### **2.3.2.3. Hidratasyon ısısı**

Hidratasyon ısısının 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 [6].

Atış, F sınıfı uçucu külleri kullanarak yaptığı çalışmada hidratasyon ısısının 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 [9,21].

Langley, Carette ve Malhotra, F sınıfı uçucu küllerle yapmış oldukları deneylerde yine hidratasyon ısısının düştüğünü ve sıcaklık artışının yavaşladığını gözlemlemişlerdir [22].

Barrow, Hadchiti ve Carrascmillo, F ve C sınıfı uçucu küller ile dört farklı cins çimentoyu farklı oranlarda karıştırarak beton üretmişler ve uçucu kül cinsinin hidratasyon ısısını değiştirdiğini gözlemlemişlerdir. Yazarların belirttiği göre, F sınıfı uçucu küller, hidratasyon ısısını düşürmekte ve sıcaklık artışını yavaşlatmakta, C sınıfı uçucu küller ise, hidratasyon ısısını değiştirmemekle beraber sıcaklık artışını yavaşlatmaktadır [23].

Poon ve ark., çalışmalarında düşük su/bağlayıcı oran kullanıldığında, %20'lik bir uçucu kül katkısının, yüksek hidratasyon ısısını durdurmak için yeterli olmayabileceğini vurgulamaktadırlar [24].

Erdoğan, uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu yer aldığından, bu tür betonların hidratasyon ısıları, katkısız betondakinden daha az olduğunu vurgulamaktadır [18].

#### **2.3.2.4. 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 bağlıdır ve sıfırın altındaki sıcaklıklarda dahi kristalleşip donmazlar. Çimento hamurundaki kılcal boşluk sistemi ise, çap ve şekilleri karışımın su/çimento oranına, hidratasyon derecesine, çimento cinsine ve katkı maddelerine göre değişen ve suyun donması sırasında asıl zararı meydana getiren boşluklardır. Hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak 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 katkıların kullanılması, günümüzde kural haline gelmiştir [6].

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 [13].

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  $SO_3$  miktarının artışı hava sürükleyici katkı ihtiyacını artırırken, toplam alkali miktarının artışı ihtiyacı azaltmaktadır. Uçucu kül özgül 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 [8,9].

### **2.3.3 Uçucu küllerin sertleşmiş beton özelliklerine etkisi**

#### **2.3.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemetleri**

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 [25].

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 pozolanik 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 [13].

Mehta ve Gjerv, 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 [26].

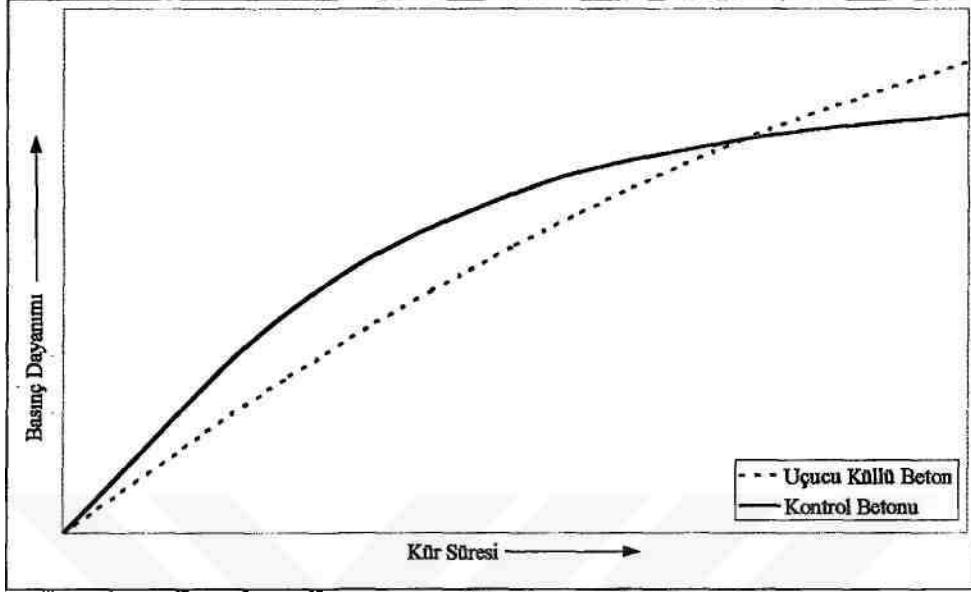
Yüksek miktarda uçucu kül (%40-%75) katkılı beton üreten, Haque, Langan ve Ward, elde edilen sonuçlar ışığında bağlayıcı madde miktardan 325-400 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen betonların yüzey uygulamaları için yeterli mukavemet, durabilite ve hacim sabitliğine sahip olduğunu belirtmiş, ancak daha fazla çalışma yapılmasını öngörmüşlerdir [9,27].

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 [28].

Crow ve Dunstan, uçucu küllerin inceliğini değerlendirerek, inceliği fazla olan uçucu küllerin çimentoyla daha iyi reaksiyona girdiğini ve daha iyi mukavemet kazandığını söylemişlerdir [8].

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 [8,14,23]. Olek ve Diamond'ın çalışmalarında, uçucu kül eklenme miktarının %15'ten %25'e artırılması ile C sınıfı uçucu küllerin F sınıfı uçucu küllere oranla daha fazla mukavemet verdiği görülmüştür [14]. Genel

olarak, uçucu küllerin ilk dayanımlarının kontrol betonuna oranla düşük, ileriki yaşlardaki dayanımlarının yüksek olduğu kabul edilerek Şekil 2.3'te olduğu gibi bir basınç dayanımı-zaman grafiği çizilebilir [8].



**Şekil 2.3:** Uçucu küllü ve kontrol betonları için basınç dayanımı-zaman grafiği [8].

Poon ve ark., uçucu kül içeren ve düşük su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlar yüksek su/bağlayıcı oranlarında hazırlanan karışımlara göre daha iyi dayanım göstermektedir. Ayrıca beton karışımlarda uçucu külün dayanıma olan katkısı harç karışımlara göre daha iyi olmaktadır [24].

Hassan ve ark., uçucu küllü betonun erken yaşlarda nispeten zayıf karakteristiklere sahip olduğunu fakat uzun dönemde silis dumanlı betonun dayanım ve taşıma karakteristiklerine ulaştığını söylemektedirler [29].

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolan etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak nihai dayanım oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı, Uçucu külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir [18].

#### **2.3.3.2. 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 külle üretilen betonların elastisite modülünün, kontrol betonuna oranla çok az bir oranda da olsa daha büyük olduğu kabul edilmektedir [8].

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 [25].

Lane ve Best yaptıkları çalışmada uçucu kül özelliklerinin az da olsa elastisite modülünü etkilediğini söylemişlerdir. Elastisite modülünün, kontrol betonu ile karşılaştırıldığında düşük dayanımlarda düşük, yüksek dayanımlarda yüksek olduğunu saptamışlardır [8,9].

Bilodeau ve Malhotra %58 oranında F tipi uçucu kül içeren betonlarda yüksek elastisite modülleri elde edildiğini ve bunun da hidrate olamayan uçucu kül tanelerinin agrega gibi etki yapmasından kaynaklanabileceğini ileri sürmüşlerdir [30].

Galeota ve arkadaşları %18 ve %25 oranlarında F tipi uçucu kül içeren betonların elastisite modüllerinin aynı mukavemetteki kontrol betonu ile aynı olduğunu ileri sürmüşlerdir [30].

Joaquin ve arkadaşları yüksek oranda F tipi uçucu kül kullanımında elastisite modülünün ilk yaşlarda düşük ancak ileriki yaşlarda başlangıç kür koşullarına çok hassas olduğunu gözlemlemişlerdir [30].

## **2.4 Silis Dumanı**

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretilmesi sırasında elde edilen, ana bileşeni  $1\ \mu\text{m}$ 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis ( $\text{SiO}_2$ ) partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde pozolanik aktiviteye sahip bir yan üründür [31].

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretilmesi sırasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85 - %98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir. Bu malzeme, “mikrosilis”, veya “silis tozu”, veya “silika füme” gibi isimlerle de

anılmaktadır. Silis dumanı, amorf yapıda ve çok ince taneli malzeme olmasından dolayı ve yüksek miktarda  $\text{SiO}_2$  içermesi sebebiyle, mükemmel bir puzolanik malzemedir [18].

Silis dumanı, elektrik ark ocaklarında silikon ve çeşitli silikon alaşımlarının üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ürün alaşımın tipi (şekli) ile suya daldırılmalı elektrik ark ocaklarında kullanılan iki temel bileşen olan kuvars ve kömürün kompozisyonu, silis dumanının kimyasal kompozisyonunu oldukça çok etkilemektedir [32].

Silis dumanı, çok ince olması ve yüksek silis içeriğinden dolayı genel olarak oldukça yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Çimentolu ortamda bulunduğu en önemli görevi,  $\text{C}_2\text{S}$  ve  $\text{C}_3\text{S}$  hidratasyonları sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$ 'i bağlamak ve yeni bir CSH jeli meydana getirmektir. Bu jel çimento hamurunda normal olarak oluşan CSH jellerinden biraz farklıdır, yoğunluğu daha azdır ancak geçirimsizliği daha fazladır. Böylece silis dumanı taneleri, büyük kristaller yerine çok sayıda daha küçük ve daha sağlam  $\text{Ca(OH)}_2$  kristallerinin oluşmasına yardımcı olmaktadır. Küçük kürecikler halindeki silis dumanı tanecikleri, uygun oranda akışkanlaştırıcı katkı kullanılması halinde, çimento taneleri arasındaki boşluklarda suyun yerini alarak daha yoğun bir çimento hamuru meydana getirebilmektedirler [33].

#### **2.4.1 Silis dumanının özellikleri**

##### **2.4.1.1. Silis dumanının kimyasal özellikleri**

Silis dumanının esas bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir. Genelde, beton içinde katkı olarak kullanılan silis dumanının  $\text{SiO}_2$  içeriği %85'in üzerindedir. İkinci esas bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  içeriği ise %1 ile %2 civarındadır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{K}_2\text{O}$  gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur.

Silis dumanının kimyasal özelliği, üretilen metalin ya da alaşımın tipine göre değişebilir. Demir silikon üretiminden elde edilen silis dumanının, demir ve magnezyum içeriği diğer silikon metal üretilen fırınlardan elde edilen silis dumanının demir ve magnezyum içeriğinden daha fazladır. Çizelge 2.2'de bazı tipik silis dumanlarının kimyasal kompozisyonu verilmiştir [34].

**Çizelge 2.2:** Silis dumanının kimyasal kompozisyonu (% olarak) [34].

| Bileşen                        | USA     | Norveç  | Kanada    | Türkiye |
|--------------------------------|---------|---------|-----------|---------|
| SiO <sub>2</sub>               | 90-93   | 90-96   | 89.0-95.0 | 93-95   |
| C                              | 1.3-2.6 | 0.5-1.4 | 2.1-4.2   | 0.8-1   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.4-0.7 | 0.2-0.8 | 0.1-3.1   | 0.4-1   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.5-1.6 | 0.5-3   | 0.1-0.7   | 0.4-1.4 |
| MgO                            | 0.3-0.5 | 0.5-1.5 | 0.3-1.0   | 1-1.5   |
| CaO                            | 0.5-0.8 | 0.1-0.5 | 0.1-1.0   | 0.6-1   |
| Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.1-0.3 | 0.2-0.7 | 0.1-0.2   | 0.1-0.4 |
| K <sub>2</sub> O               | 1-1.2   | 0.4-1   | 0.5-1.4   | 0.5-1   |
| S                              | 0.1-0.2 | 0.1-0.4 | 0.1-0.2   | 0.1-0.3 |
| Kızdırma Kaybı                 | 1.4-2.8 | 0.7-2.5 | 2.3-4.4   | 0.5-1   |

#### 2.4.1.2. Silis dumanının fiziksel özellikleri

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişen renkte olabilir. Koyuluk, içeriğindeki karbonun artmasıyla artmaktadır [32].

Silis dumanı çok ince öğütülmüş parçalar içermektedir. Parçaların büyük çoğunluğunun boyu 0.1-0.2 µm arasındadır. Bu boyut, bir Portland çimentosunun taneciklerinin ortalama boyutundan 100 kez daha küçüktür. Genelde 45 µm eleğinin üzerinde kalan malzeme boyut üstü (kalın) olarak kabul edilmektedir [18].

Kalın malzemenin silis dumanı içindeki yeri genellikle %6'nın altındadır. Silis dumanının özgül alanı Blaine aleti ile ölçülememektedir. Nitrojen emme yöntemi ile ölçülen özgül yüzeyi çoğunlukla 130.000-280.000 cm<sup>2</sup>/gr arasında değişmektedir. Betonda kullanılan silis dumanı özgül yüzeyi 200.000 cm<sup>2</sup>/gr civarındadır.

Silis dumanının inceliği diğer malzemelerle karşılaştırıldığında daha iyi görülmektedir:

Silis : ~ 200.000 cm<sup>2</sup>/gr

Tütün Külü : ~ 100.000 cm<sup>2</sup>/gr

Uçucu Kül : 4.000~7.000 cm<sup>2</sup>/gr

Normal Portland Çimentosu : 3.000 cm<sup>2</sup>/gr

Beton için uygun olan silis dumanlarının özgül ağırlıkları 2.2-2.3 arasındadır. Silis dumanının üretildiği gevşek haldeki birim ağırlığı genelde  $200\sim300 \text{ kg/m}^3$  arasındadır. Gevşek haldeki Portland çimentosunun birim ağırlığı ise  $1500 \text{ kg/m}^3$ 'tür [35].

Aşırı ince olmasından dolayı, silis dumanının su ihtiyacı oldukça fazladır. Bu su ihtiyacı, uçucu kül ve doğal puzolanlar için verilen üst sınırların çok üzerindedir. Çizelge 2.3'te silis dumanının puzolanik aktivitesi ve su ihtiyacı için bulunan sonuçlar, uçucu kül ve doğal puzolanlardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır [18].

**Çizelge 2.3:** Silis dumanının puzolanik aktivitesinin ve su ihtiyacının uçucu kül ve doğal puzolan ile karşılaştırılması[18].

|                                                                   | ASTM C618'in sınırları |                    |                    | Silis dumanı |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|--------------|
|                                                                   | Doğal puzolan          | F sınıfı uçucu kül | C sınıfı uçucu kül |              |
| Dayanım aktivite indisi 28 günde kontrol numunesine oranla % min. | 75                     | 75                 | 75                 | 110          |
| Su ihtiyacı<br>Kontrol numunesinin % max.                         | 115                    | 105                | 105                | 134          |

## 2.4.2 Silis dumanının taze beton özelliklerine etkisi

### 2.4.2.1. İşlenebilme, su ihtiyacı ve terleme

Silis dumanlı beton, sadece Portland çimentosu ile yapılmış olan betondan çok daha koheziftir. Gerek yüksek kohezyondan ve gerekse ince katı taneciklerin arasında daha çok temas olmasından, silis dumanlı betonların işlenebilmesi azdır. Betona katılan silis dumanının oranı çimento ağırlığının %5'inden daha yukarılara çıktıkça, beton daha yapışkan olmaktadır [18].

Duval ve Kadri, düşük S/B oranında ve süper plastikleştirici kullanılan karışımlarda, silis dumanının çimentoyla %10 oranında yer değiştirmesinin işlenebilirliği azaltmadığını belirtmişlerdir [36].

Jahren, silis dumanı katılmış taze betonların daha yapışkan olduğunu belirtmektedir. İşlenebilirliklerini bir süre koruyabilmeleri için, ilk çökme değerinde 50 mm civarında bir artışı öngörmektedir. Yapışkanlıktaki artış, taze betonda silis dumanı partiküllerinin yüzey alanının büyüklüğünden dolayı meydana gelen içteki su alma

reaksiyonuna ve çimentosal malzemelerin taneleri arasındaki temas alanlarının artışına bağlıdır [37].

Silis dumanı tanelerinin çok ince olmasından dolayı, belirli bir çökme değeri için betonun su ihtiyacı artmaktadır. Bu yüzden, betonda daha az su kullanmak amacıyla, silis dumanlı katkılarla yapılan betonlarda su azaltıcı katkı malzemelerinin de kullanılması gerekmektedir [18].

Bu nedenle, silis dumanının beton teknolojisinde kullanımı ancak süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddelerinin geliştirilmesinden sonra yaygınlaşmıştır [38].

Aitcin ve Laplante, betona %10 silis dumanı ilavesinin su ihtiyacını azalttığını, normal betonlarda %5 ve daha az silis dumanı ilavesinin su ihtiyacına bir etkinsinin olmadığını belirtmiştir. Bununla birlikte, silis dumanı miktarının artmasıyla, su ihtiyacı da artmaktadır [39].

Silis dumanlı beton vizkositeyi ve iç kohezyonu artırmaktadır. Bu nedenle normal betona göre ayrışmaya daha az eğilimlidir. Ancak silis dumanlı betona akışkanlaştırıcı ilave edildiğinde ve taze beton uzun süre vibrasyona maruz kaldığında, slump yüksek ise ayrışma meydana gelebilir [40].

#### **2.4.2.2. Priz süresi**

Çimento ağırlığının %7- %10'u kadar silis dumanı katılarak yapılan betonların priz süreleri, katkısız betonunkinden çok farklılık göstermemektedir. Daha çok miktarda silis dumanı kullanıldığı takdirde, priz süresi biraz daha uzun olabilmektedir [18,40].

Silis dumanının çok ince taneli olması ve yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  içermesi, puzolanik reaksiyonların çok erken yaşlarda başlamasına neden olmaktadır. Araştırmalar, puzolanik reaksiyonların, çimentonun hidrasyonunun başlangıcından bir gün sonra başladığını, 3. günden sonra belirgin hale geldiğini ve 28. günde büyük ölçüde tamamlandığını göstermiştir [41].

Silis dumanı katkılı çimento hamurları genellikle daha geç priz alırlar. Katkı miktarı çimento ağırlığının %10'unu geçmedikçe bu etki önemsenebilir. Betonda kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıların da priz süreleri üzerinde etkileri mevcuttur. Örneğin, çimentoyla %15 oranında yer değiştirilen silis dumanı katkılı ve

süper akışkanlaştırıcı betonlarda, priz başlangıç ve bitiş süresinde sırası ile 1 ve 2 saatlik uzamalar gözlenmiştir [42].

Çelik ve ark., Silis dumanının çimentoyla % 5 oranında yer değiştirdiği karışımlarda, priz başlama ve bitiş sürelerinde bir değişiklik olmadığını belirtmişlerdir. %10-15 oranlarında silis dumanı kullanıldığında ise, priz başlama ve bitiş sürelerinin belirgin olarak geciktiği ortaya çıkmıştır [35,43].

#### **2.4.2.3. Hidratasyon ısısı**

Çimento ağırlığının %7-%10'u kadar silis dumanı kullanılarak yapılan betonların ilk 72 saat içerisindeki hidratasyon ısısı, silis dumanı kullanılmayan betonlardan biraz daha fazla olabilmektedir. Ancak, silis dumanlı betonlarda, silis dumanı kullanılmayan betonlarınkine göre, yaklaşık %8-%10 kadar daha az hidratasyon ısısı çıkmaktadır [18].

Yeğinoğlu, silis dumanının çok etkin bir puzolan olarak hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırdığını ve daha yoğun olarak devam ettirdiğini belirtmektedir [33]. Silis dumanı katkısı; OH<sup>-</sup> iyonlarının ve alkalilerin gözenekli sıvılarda serbest kalmasından dolayı, çimentonun erken yaştaki hidratasyon hızını artırmaktadır. Silis dumanı, ilk birkaç saat boyunca C<sub>3</sub>A ve C<sub>3</sub>S hidratasyonlarını hızlandırmaktadır. Bu kireç, CSH ve etrengit gibi hidratasyon ürünlerine çekirdekleşme alanları yapmayı sağlamaktadır [44].

#### **2.4.2.4. Hava sürüklenme**

Silis dumanının beton karışımına ilavesi ile karışım için gerekli hava katkı maddesi ihtiyacı, portland çimentosuna göre daha fazla artmaktadır. Bunu sebebi, silis dumanının özgül yüzeyinin yüksek olmasına (çok ince taneli olmasına) ve içerdiği yanmamış karbona bağlanabilmektedir [18].

Bazı araştırmacılara göre, yüksek oranda silis dumanı ilave edilen betonda , süperakışkanlaştırıcı kullanıldığı durumda dahi %5 hava sürüklenmeyi tespit etmek oldukça zordur [45].

### **2.4.3 Silis dumanının sertleşmiş beton özelliklerine etkisi**

#### **2.4.3.1. Mukavemet kazanımı, basınç ve eğilme mukavemeti**

Silis dumanının betona ilavesi basınç dayanımını oldukça artırmaktadır. Silis dumanının betondaki boşlukları doldurma ve puzolanik etki olmak üzere iki işlevi

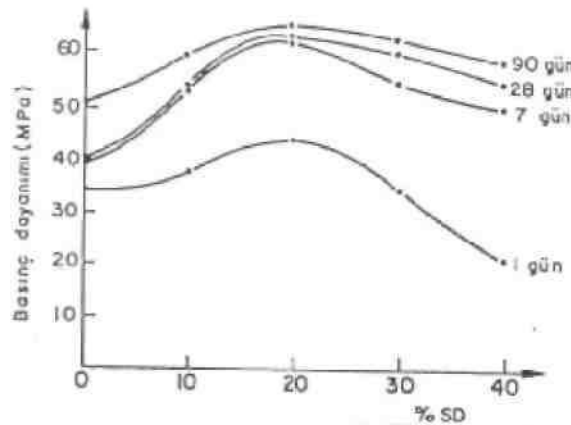
vardır. Bunlardan hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır [46]. Ancak silis dumanının puzolanik etkisinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu, mikroyapısal ve mekanik incelemelerle kanıtlanmıştır [47].

Bu ise boşluk oranının azalmasından kaynaklanmaktadır. Bununla beraber silis dumanının herhangi bir akışkanlaştırıcı kullanılmadan beton karışımına ilavesi su ihtiyacını artırmakta böyle bir durumda suyun artması ise dayanımda azalmalara sebep olmaktadır. Bu nedenle silis dumanı neredeyse her zaman akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılarak su-bağlayıcı oranının azaltılması sağlanmaktadır [47].

Taşdemir ve ark., betonda silis dumanı kullanımının agrega-harç temas yüzeyinin mikroyapısal özelliklerini değiştirdiği, bu ara yüz bölgesinin daha yoğun ve daha homojen hale geldiği, bunun sonucu olarak malzemenin daha gevrek davranış sergilediğini belirtmiştir. Silis dumanı içeren betonlarda gevreklik indisinin belirgin biçimde arttığını bunun sonucu olarak da betonun daha gevrek bir davranış sergilediğini belirtmiştir [48].

Bazı araştırmalara göre silis dumanının dayanıma kazandırdığı artış, çimento harç matrisinin daha yüksek kalitede sonuç vermesine bağlıdır. Bazılarına göre ise beton dayanımının artışı, harç ve agrega arasındaki gelişmiş bağın artmasıyla ilgilidir. Silis dumanının çimento harcındaki geniş boşlukları azaltarak homojenliği artırdığı bilinmektedir. Böylece daha kuvvetli bir malzeme oluşmasına neden olmaktadır [49].

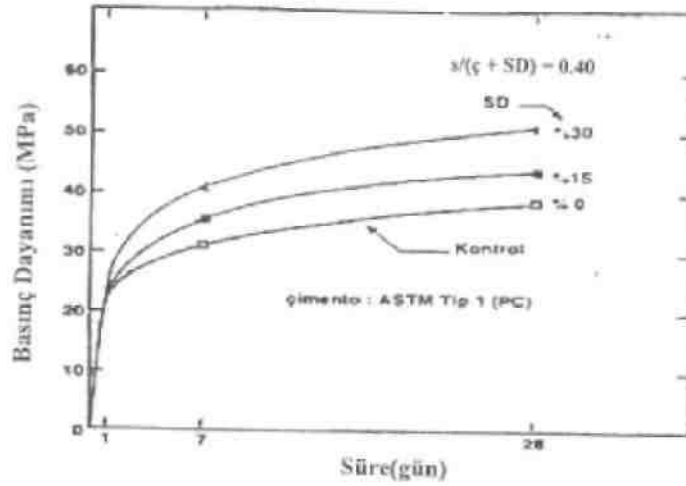
Silis dumanı katkısının beton dayanımına etkisi aşağıdaki Şekil 2.4'te açıklanabilir [33].



**Şekil 2.4:** Silis dumanı katkı yüzdesinin beton dayanımına etkisi [33].

Silis dumanı taneleri, CSH jelleri oluşturmalarının dışında, çimento hamurunu agrega-hamur ara yüz geçiş bölgesini sıkılaştırıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırmaktadır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su gereksiniminin artması gibi olumsuz etkileri de olabilmektedir. Betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlıdır ve çimento, agrega ve akışkanlaştırıcı katkının tipi ve miktarları ile bakım koşulları gibi faktörlerden etkilenmektedir [50].

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendisini gösterir. Ancak su-bağlayıcı oranının % 40 civarına indirilerek 1 günlük dayanımı bile yükseltmek mümkündür [42]. Şekil 2.5’ te görüldüğü gibi, süper akışkanlaştırıcı kullanılarak ve S/B oranını %40’ta sabit tutarak dökülen betonlarda çimentonun %30’una kadar varan miktarda katılan silis dumanı, ilk birkaç günden itibaren dayanımları artırmaktadır [51].



**Şekil 2.5:** Silis dumanı katkısının beton basınç dayanımına etkisi [51].

İleri yaşlarda olumlu etkileri azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda 90. günden sonra dayanım düşebilmektedir [52]. Diğer taraftan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını bildirenler de vardır [39].

Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanının genellikle çimentonun %10-20'si oranında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarıyla birlikte kullanıldığı görülmektedir [33].

28 günlük basınç dayanımı 50-70 MPa civarında olan yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı ile çimentonun yer değiştirme oranı yaklaşık %15 olarak tespit edilmiştir. Çimento miktarı arttıkça ve S/B oranı düştükçe, silis dumanının etkisi azalmaktadır [53].

Silis dumanı katkılı betonlarda eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı, katkısız betonlardakine benzemektedir. Basınç dayanımı arttıkça, eğilme dayanımları da artar. Silis dumanı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması, eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlardakinden daha küçük olmasına yol açmaktadır [42].

Bhanja ve Sengupta, diğer karışım parametreleri sabit tutularak silis dumanı miktarının artırılmasıyla, eğilme dayanımında kayda değer bir artışın olduğunu belirtmişlerdir. Optimum 28 günlük çekme dayanımının %5-10 silis dumanı yer değişimiyle, eğilme dayanımının ise %15-25 silis dumanı-çimento yer değişim oranında elde edildiğini bildirmişlerdir [35,54].

#### **2.4.3.2. Elastisite modülü**

Betona silis dumanı eklenmesiyle, beton karışımı içerisinde bulunan agrega ve hidrate olmuş çimento hamuru arasındaki geçiş bölgesinin porozitesi azalır. Dolayısıyla, agrega tanelerinin aralarındaki boşluk azalacak ve daha sert bir yapı oluşturarak betonun da daha sert, kompozit bir yapı olmasını sağlayacaktır [45].

Betonda elastisite modülü dayanımla birlikte artar, ancak artış katkısız betonlara göre daha yavaş olur. Bazı araştırmacılara göre normal ve silis dumanlı betonlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisi veya aynı dayanımdaki elastisite modülü fazla farklılık göstermez. Diğer bir grup araştırmacıya göre silis dumanı katkısının elastisite modülünü arttıracak ancak bu artışın dayanımdaki artış kadar fazla olmayacağını öne sürmüştür [55,56].

Yapılan bir araştırmaya göre, %5 oranında silis dumanı içeren numuneler ile %10,%15 ve %20 oranında silis dumanı içeren numunelerin elastisite modülleri karşılaştırılmış ve silis dumanı oranı yükseldikçe elastisite modülünün azaldığı görülmüştür [57].

## 2.5 Kalsit

Kalsit bir mineral adı olup karbonatlı kayalar oluşturur bu mineralin kimyasal yapısı  $\text{CaCO}_3$  dır. Çeşitli şekillerde kristal halde bulunan (rombaeder, skalenoider şeklinde kristallenir) camsı parlaklıkta, renksiz saydam yapıdadır. Kolay öğütülür ve beyaz renkli bir toz elde edilir, sertliği Moh's skalaya göre 3, yoğunluğu ise 2,6-2,7 civarındadır [58].

Ülkemizde kalsit adı ile üretilen mineral karbonatlı kayaların (kireç taşları, mermer, tebeşir) ana mineralidir.

Bu formasyonlar:

- Kireç taşları (Metamorfizma geçirmemiş) birincil kayalardan beyaz renkli olanları Fransa, Mısır gibi ülkelerde öğütülerek değerlendirilir.)
- Mermerler (kireç taşlarının metamorfizmayla yeniden kristalleşmesi ile oluşur, ülkemizde mermer olarak yapı sektöründe ve beyaz renkli ve iri kristalli olanları bu rapora konu olan mikronize dolgu sanayiinde kullanılır.)
- Kristal kalsitler (kireç taşı formasyonu arasında çatlak dolgularında saf saydam kristaller şeklinde oluşur genellikle ticari olarak üretim yapılamamaktadır.)
- Tebeşir (organik fosiller olup İngiltere'de, Avrupa'nın bazı yörelerinde bulunur, beyazlık derecesi 87-88 civarında olup öğütülmesi kolaydır. Fakat ülkemizde üretimi yapılmamaktadır.)

Dünyada ticari olarak üretilen kalsit, (kalsiyum karbonat) oluşumları:

- Beyaz renkli, saf kireç taşları
- İri kristalli mermerler (Türkiye'de üretilen)
- Beyaz tebeşir oluşumları

olmaktadır.

Bunların içersinde beyazlığı en yüksek olanlar iri kristalli mermerler olmaktadır. Fakat diğerlerine göre öğütmede kullanılan enerji daha fazladır. Mikronize kalsitin kimyasal özellikleri Çizelge 2.4'te gösterilmiştir [58].

**Çizelge 2.4:** Mikronize kalsitin kimyasal özellikleri [58].

| Kimyasal Özellikler            |          |
|--------------------------------|----------|
| CaCO <sub>3</sub>              | % 96-98  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %0.2     |
| SiO <sub>2</sub>               | % 0.2    |
| MgO                            | % 2 Max. |
| Beyazlık                       | 95 Min.  |

### 2.5.1 Türkiye'deki kalsit oluşumları

#### Marmara Bölgesi

Çanakkale Karabiga Bölgesi, Türkiye’de mevcut en iri kristalli kalsit oluşumlarından biridir. Granit kontağında oluşan kalsit yatakları yüksek beyazlıktadır ve öğütülmesi kolaydır, fakat Ege Bölgesi ve Niğde’de bulunan oluşumlara göre beyazlığı daha düşüktür.

Bayramiç, Biga, Ezine’de mermer yatakları bulunmaktadır.

Balıkesir Erdek ve Manyas’da çok zengin iri kristalli mermer yatakları ve ocakları bulunmaktadır.

Trakya’da Yıldız dağları, Bursa Orhaneli’nde mermer ve Dolomitik mermer yatakları bulunmaktadır.

Bursa Orhangazi, Keles, İnegöl zengin mermer yataklarına sahiptir, fakat üretim çok küçük çapta yapılmaktadır.

İzmir Tire, Gölarmara, Akhisar, Torbalı mermer yatakları bulunmaktadır. Beyazlık derecesi daha önce belirtilenlerden daha düşüktür.

Muğla Yatağan ve Kavaklıdere Bölgesi kristal yapısı daha küçük fakat kimyasal yapısı daha saf ve öğütülebilirliği kolay beyaz ve çok zengin mermer yataklarına sahiptir ve beyazlığı çok yüksektir.

Niğde Bölgesinde son 10 yıl içerisinde çok hızlı üretim artışı yapan kalsit ocakları bulunmaktadır ve çok zengin rezerve sahiptir Türkiye'deki en beyaz oluşumlardır [58].

Yukarıda belirtilen bölgeler rezervi 10 milyonlarca tonla ifade edilebilir çok zengin rezerve sahip bölgelerdir. Bunların dışında henüz üretim ve rezerv tespiti

yapılmayan Anadolu'nun hemen her bölgesinde kalsit oluşumuna rastlamak mümkündür. Bilinen rezervlerin toplamı yüz milyonlarca ton ile ifade edilebilir [58]. Dikkati çeken en önemli noktalar Türkiye'deki rezervlerde:

- $\text{CaCO}_3$  yüzdesi yüksektir.
- Silis ve demir safsızlıkları çok düşük orandadır.
- Öğütüldükten sonraki beyazlık derecesi çok yüksektir.

Cevherde beyazlık derecesinin yüksekliği boyada ve plastikte titanyum dioksit ve kağıtta optik beyazlatıcı tasarrufu sağladığı için daima tercih edilmektedir.

### **2.5.2 Mikronize öğütülmüş kalsitin inşaat sektöründe tüketim alanları**

Türkiye'de yeni gelişmekte olan hazır sıva, macun v.b. olanlarda beyaz dolgu kullanılması, Avrupa ve ABD'de çok yaygındır.

İnşaat sektöründe beyaz renkli, çimento esaslı sıva ve macunlar toz polimerlerle karıştırılıp duvara tatbik edildiğinde kaba sıva, ince sıva, macun ve hatta boya işlemi bir kalemde çözülmektedir.

Yakın gelecekte çeşitli boyutlarda öğütülmüş kalsit, alçı, çimento, toz polimer bağlayıcılarla karıştırılıp inşaat alanında yoğun olarak kullanılmaya başlayacaktır. Bu sektör tonaj olarak en büyük oranda kalsit tüketimi alanı oluşturacak bir sektördür [58].

### **2.5.3 Kalsitin üretim yöntemi ve teknolojisi**

Ülkemizde kalsit ( iri kristalli mermer) üretimi açık işletme metoduyla işletilen maden ocaklarında yapılmaktadır. Mikronize üreticileri hammaddeyi en yakın yörede mevcut üretici madencilerden temin etmektedir.

Kalsit, inşaat sektörü için uygun olmayan iri kristalli mermer yataklarında delme makinaları ile delip patlatılır. Çıkan cevher üretim kapasitesine göre ocaklarda ya elle ayıklanır veya kırma tesislerinden geçirilip triyaj bandında rengi kirleten kısımlar elle ayıklanır ve yaklaşık 3mm.'lik bir elekten geçirildikten sonra ocakta stoklanıp tesislere sevk edilir.

Avrupa’da ve diğer bazı ülkelerde yüksek beyazlık ve saflıkta kalsit cevheri üretmek için yer altı işletmesi ve flotasyon metodu kullanıldığı dikkate alınrsa ülkemizde kaliteli hammadde temini nispeten daha düşük maliyetlerle gerçekleşmektedir [58].

#### **2.5.4 Kalsitin beton özelliklerine etkileri**

Yahia ve ark. tarafından yapılan araştırma göstermiştir ki kireçtaşının(%98’i kalsit) etkinliğini su/çimento oranı ve kullanılan kireçtaşı dolgu malzemesinin içeriği etkilemektedir. 0.35-0.45 arasında değişen su/çimento oranlarıyla yapılan bu çalışmada kireçtaşı katkısı eklemek akıcılıkta önemli bir değişiklik yapmamıştır. Ancak kritik dozun üstünde karıştırılan bazı kireçtaşı karışımları harcın akıcılığını önemli ölçüde arttırmıştır. Bu çalışmada görülmüştür ki kireçtaşının fiziksel özelliklere etkisi su/çimento oranı ve kireçtaşı dozajı gibi karışım parametrelerine bağlıdır [59].

Çimento esaslı malzemelerin viskozitesi su/çimento oranı düşürülerek veya kireçtaşı gibi dolgu malzemeleri eklenerek bağlayıcılığın artırılmasıyla olumlu yönde değiştirilebilir [60].

Çimento esaslı malzemelere kireçtaşı eklenmesi fiziksel veya kimyasal bir çok malzeme özelliğini iyileştirir. Kireçtaşının tane boyutuna bağlı olarak karışımın yoğunluğu artar ve arayer boşukları azalır, bu değişimler hapsolmuş havanın azalmasına sebep olurlar [61]. Kireç taşının kimyasal değişime etkisi ise çözülme safhasında iyonlar ekleyerek hidrasyonun kinetik enerjisini ve hidrasyon ürünlerinin morfolojisini değiştirmek olmuştur [62].

Yüksek akışkanlıktaki harçlarda çimentonun kireçtaşıyla eş değer hacimde kısmi yerdeğiştirmesi akıcılıkta değişime ve akma gerilmesinde azalmaya sebep olur [63]. Bir başka çalışmada göstermiştir ki yüksek akışkanlıktaki harçlarda su/çimento oranının 0.35 ile 0.41 arasında değiştiği durumlarda çimentoyla kireç taşının %5 ile %20 arasında eş değer hacimde yer değiştirmesi akıcılıkta değişikliğe yol açmıştır [64].

Bonavetti ve ark. Yaptığı çalışmada %20’ye kadar eklenen kireçtaşının(%85’i kalsit) hidrasyon derecesine, hidrasyon ürünlerine etkisi ve 0.25 ile 0.5 arasında değişen su/çimento oranlarında optimum çimento-kireçtaşı değişimi bulunmaya çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki düşük su/çimeto oranında kireçtaşı içeriği artırıldığında hidrasyon derecesindeki artış düşük olmuştur. Ancak en büyük

hidratasyon ürünleri hacmi yüksek su/çimento oranında görülmüştür. Kireçtaşı içeren betonlarda 28. gün beton dayanımında küçük bir azalma gözlemlenmiştir. Düşük su/çimento oranında çimentonun büyük bir kısmı hidrate olmadan kalmıştır. Kireçtaşı kullanılması ekonomik ve ekolojik koşullar açısından daha gerçekçi olmaktadır. Kullanılacak kireçtaşı oranı her karışımda farklılık göstermektedir. Bu araştırmada görülmüştür ki düşük su/çimento oranına sahip harçlara %10-15 arasında kireçtaşı eklenmesi erken yaş dayanımlarını etkilemezken ileri yaş dayanımlarında azalmaya sebep olmuştur. Kireçtaşının dayanımı düşürmesini engellemek için su/çimento oranında azaltmaya gidilmelidir [65].

Kireçtaşı içeren Portland çimentosu kullanmak teknik, ekonomik ve ekolojik olarak avantajlar sağlamaktadır. Teknik avantajlar arasında erken yaş dayanımını arttırması, düşük çimento içeriğinde terlemeyi kontrol etmesi ve kötü kür koşullarına daha az hassasiyet gösterilebilir [66]. Kimyasal açıdan bakacak olursak kireçtaşının puzolanik bir etkisi yoktur ancak çimentonun alimüne fazıyla reaksiyona girerek dayanımda önemli bir değişiklik yapmadan kalsiyum monokarboalüminat hidrate (AFm) meydana getiriler [67].

Kireçtaşının en büyük etkisi fiziksel değişim üzerinde olmaktadır. Çimento tanelerinin daha yoğun olmasına ve çimento gralünometrisinde daha büyük ayrılmalara sebep olur [68].

Ünal ve ark. tarafından yapılan araştırmada mermer tozu 2mm elekten elenerek betonun içersinde ince malzeme olarak kullanılmıştır. 300 ve 350 dozlu 2 farklı tipte beton üretilmiştir. Bu betonlara %10-15 ve 20 oranlarında mermer tozu eklenmiştir. Elde edilen numunelerde basınç ve yarma deneyleri yapılmıştır. 300 dozlu numunede %10 mermer tozu eklendiği durumda şahit numuneye göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bu artış eğilimi % 20 mermer tozu ilavesinde azalmasına rağmen yinede şahit numuneye göre dayanım yüksektir. 300 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri Çizelge 2.5'te gösterilmiştir [69].

**Çizelge 2.5:** 300 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri [69].

| Karışım | Ultrases Hızı<br>(km/sn) | Küp Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Silindir Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Silindir Yarmada<br>Çekme Dayanımı<br>(MPa) |
|---------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| MT0     | 4,41                     | 16,3                            | 13,9                                 | 2,2                                         |
| MT10    | 4,43                     | 20,4                            | 19,2                                 | 2,3                                         |
| MT15    | 4,31                     | 21,1                            | 18,6                                 | 2,1                                         |
| MT20    | 4,33                     | 17,6                            | 14,8                                 | 2,0                                         |

350 dozajlı karışımlarda ise mermer tozunun kullanılması hem küp hem de silindir numunelerde şahit numuneye göre %10 mermer tozunda azalma eğilimine karşılık %15 mermer tozundan itibaren az da olsa artış eğilimi görülmektedir. Dayanımlarda görülen artışlar mermer tozunun kireçtaşı kökenli olmasına ve betonun yapısına bağlanabilir. 350 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri Çizelge 2.6'da gösterilmiştir [69].

**Çizelge 2.6:** 350 dozlu betonun 28 günlük dayanım değerleri [69].

| Karışım | Ultrases Hızı<br>(km/sn) | Küp Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Silindir Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa) | Silindir Yarmada<br>Çekme Dayanımı<br>(MPa) |
|---------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------|
| MT0     | 4,15                     | 18,0                            | 18,2                                 | 2,6                                         |
| MT10    | 4,41                     | 16,9                            | 17,7                                 | 2,5                                         |
| MT15    | 4,31                     | 19,8                            | 18,2                                 | 2,4                                         |
| MT20    | 4,51                     | 21,2                            | 19,6                                 | 2,0                                         |

Kireç taşı tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler oluşturabilir. Kireç taşı tozu elektrostatik olarak negatif, kum ve iri agrega pozitif yüklü olduğundan agrega yüzeyine yapışır. Bu yapışmayı engellemek için, malzemelerin karıştırma sırasına ve yöntemine dikkat etmek gerekir. Mikro yapı incelemesi ile yapılan çalışmalarda en iyi ince kesit görüntüsü, önce çimento ve taş tozunun karıştırılıp, sonra agreganın ilave edildiği durumda elde edilmistir [70].

Petersson yaptığı araştırmada betonun dayanım kazanma hızına etkisi üç mekanizma [70] ile açıklanmaktadır:

- 1- CSH oluşumuna uygun çekirdek oluşturarak hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırır.

2- Özellikle  $C_3A$  sını yüksek çimentolarla reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan karboalüminat oluşturur.

3- İnceliği arttıkça hidratasyonu hızlandırır ve erken dayanımı artırır, fakat nihai dayanımda değişiklik meydana gelmez.

Benachour ve ark. tarafından yapılan araştırmada görülmüştür ki kalsit dolgu malzemesi yüzeyinde suyu absorbe etmiş, bunun sonucunda su ihtiyacı artmıştır. Ayrıca dolgu malzemesi betonda boşlukların azalmasını sağlar. Boşluk miktarıyla elastisite modülü arasında ters orantı vardır. Boşluk miktarı azaldığı için elastisite modülü artar ve betonun sehim yapabilme kapasitesi düşer. Dolgu malzemesi eklenmesiyle basınç dayanımı artar veya aynı kalır. Optimum basınç ve yarma dayanımı artışı %0 ile %25 arasında dolgu malzemesi konulduğunda ortaya çıkar. Dayanımlardaki artış dolgu malzemesinin boşlukları doldurma ve daha güçlü çimento hamuru oluşturmamasından kaynaklanmaktadır [71].

Kalsitli dolgu tozları hidratasyon sırasında katalizör ve fiziksel etkiye sahiptir. Çimento hidratasyonu sırasında kalsitin ( $CaCO_3$ ) ilk önce  $C_3A$  ve  $C_4AF$  ile reaksiyonu oluşur. Kalsitin inceliğine göre  $C_3A$  ve  $C_4AF$ 'nin reaktivitesi artar[72,73]. Ramachandran  $CaCO_3$  kalsiyum silikat hidrate ile birleşirken çekirdeklenme etkisini açıklamıştır. Kalsitin katalizör etkisi yüksek özellikteki yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Hızlandırılmış kimyasal reaksiyon sonucu kalsiyum silikat hidrate kristalinin boyutu küçülür. Bu reaksiyon sırasında kalsit taneleri çimento hamuruyla bütünleşir [72].

Kalsitin fiziksel olarak da bir çok etkisi vardır. Dolgu malzemesi çimentoyla yer değiştirildiğinde seyreltme etkisi olur. Çimento hamuru miktarı azalır ve bundan dolayı basınç dayanımını arttırmaz [73]. Belli bir miktara kadar eklenen dolgu malzemesi çimento hamurunun daha sıkı birleşmesini sağlar. Buna “filler etkisi” denir [74]. Kalsit betonun en zayıf bölgesi olan hamurla agregalar arasındaki geçiş bölgesini de kuvvetlendirir. Topçu ve ark. %7 ile 10 arasında kullanılan filler malzeme betonun geçirimsizlik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiğini söylemiştir [75].

Esping'in yaptığı çalışmada farklı yüzey alanlarına sahip kireçtaşı dolgu malzemesinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kireçtaşının yüzey alanı BET methoduyla belirlenmiştir. Deneyler 0.55 su/çim oranıyla üretilen

kendinden yerleşen beton numuneler üzerinde yapılmıştır. Sonuç olarak yüzeysel alan arttıkça yüksek viskozite ve çekme dayanımı, düşük çökme yayılması görülmektedir. Yüzeysel alanı fazla olan malzeme kullanıldığında KYB'nin akışkanlığı azalır, otojen rötre artar, terlemeyi azaltır, plastik çatlak riskini azaltır ve daha yüksek basınç dayanımı sağlanır. Yüzey alanı yüksek olan malzeme kullanıldığı sabit akışkanlığı sağlamak için su miktarını arttırmak gerekir. Sabit akışkanlığı elde etmek için eklenen su neticesinde plastik çatlak riski artmış, dayanım azalmıştır [76].

Kireçtaşı puzolanik bir dolgu malzemesi değildir ancak çimentonun içindeki  $C_3A$  ile reaksiyona girerek karboalüminat oluşturur. Bu reaksiyon dolgu malzemesinin inceliği ve yüzey alanı, çimentonun  $C_3A$  içeriği ile artar. Sonucunda çimentonun hidrasyonunu ayarlar ve basınç dayanımını artırır [77].

Felekoğlu ve ark. yaptıkları çalışmada erken yaş dayanımı göz önüne alındığında kireçtaşı numuneleri uçucu küllü numunelere göre daha yüksek dayanıma sahipken 28 gün sonunda uçucu küllü numuneler puzolanik reaksiyona girdikleri için daha yüksek dayanım verdiğini görmüşlerdir [78].

Zhu ve ark. yaptıkları çalışmada portland çimentosuyla kireçtaşı(%99,3'ü kalsit) eklenmiş çimento karşılaştırıldığında kireçtaşı eklenmiş üretimlerde aynı işlenebilirlik daha az katkıyla sağlanabildiğini görmüşlerdir. Bu da ekonomik açıdan önemli bir etkidir. Kireçtaşı eklenen numunelerin dayanımları şahit numunelere göre oldukça yüksek olmuştur. 7 günlük küp dayanımında %60-80, 28 günlük dayanımında ise %30-40'lık bir fark gözlemlenmiştir [79].

Çankayalı ve ark. yaptıkları çalışmada ince malzeme hamurunun plastik viskozitesinin ve kayma eşiğinin ayarlanması için ince malzeme hamuruna değişik oranlarda elek altı kalker tozu(%95'i kalsit) ikamesi yapılarak, farklı su/çimento oranlarındaki plastik viskozite ve kayma eşiğini tespit etmişlerdir. Kalker tozu ikamesinin artmasıyla viskozitenin arttığı ve daha homojen bir yapı ortaya çıktığını gözlemlenmiştir. Eşit su/çimento oranında olmalarına rağmen %15 kalker tozu olan betonlarda viskozitenin yüksek ve ayrışmanın olmadığı, %9 kalker tozu olan numunede betonda ince malzemeni yetersiz kalması nedeniyle ayrışma durumu görülmüştür. Ayrıca kalker tozunu ikamesinin artmasıyla basınç dayanımında artış olmuştur [80]. Bu durum kalker tozunun betondaki mikro gözenekleri doldurması ve boşluksuz bir yapı oluşturmaya bağlanabilir.

Gökçe ve ark. betonlarda mermer tozunu(%91'i kalsit) ince agregayla hacimce ikame ederek üretimler yapmışlardır. Hazırladıkları düşük dozajlı betonlarda( $220 \text{ kg/m}^3$ ) mermer tozu ikamesinin artmasıyla işlenebilirliğin ve kıvam koruma arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca mermer tozu ilavesinin artmasıyla plastik viskozitede de artış, kayma eşiği değerinde ve ayrışma sorununda düşüş olduğunu görmüşlerdir [81].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri verilmektedir.

#### 3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler

##### 3.1.1 Çimento

Kullanılan çimento CEM I PÇ 42.5 N olup Oyak Çimento fabrikasının üretimidir. Fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda verilmektedir. Çimentonun fiziksel, kimyasal mekanik özellikleri 3.1’de verilmektedir.

**Çizelge 3.1:** Üretimlerde kullanılan çimentonun özellikleri.

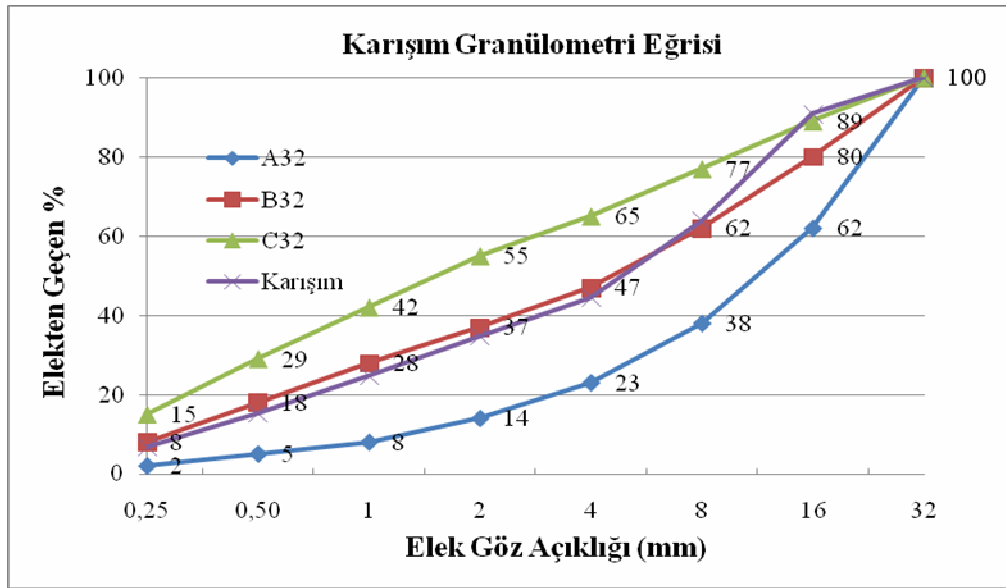
| Fiziksel Özellikler                    |                         |
|----------------------------------------|-------------------------|
| Özgül yüzey (Blaine)                   | 3835 cm <sup>2</sup> /g |
| Özgül ağırlık                          | 3,21 g/cm <sup>3</sup>  |
| Priz başlangıcı                        | 175 dakika              |
| Priz sonu                              | 290 dakika              |
| La Chatelier iğnelerinde toplam açılma | 1 mm                    |
| Mekanik Özellikler                     |                         |
| Basınç dayanımı (2.gün)                | 25,2 Mpa                |
| Basınç dayanımı (28. gün)              | 55,5 Mpa                |
| Kimyasal Özellikler                    |                         |
| SiO <sub>2</sub>                       | % 19,54                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | % 4,98                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | % 5,58                  |
| CaO                                    | % 62,85                 |
| MgO                                    | % 1,33                  |
| SO <sub>3</sub>                        | % 2,69                  |
| Çözünmeyen kalıntı                     | % 0,31                  |
| Kızdırma kaybı                         | % 2,27                  |
| Serbest kireç                          | % 2,85                  |
| Toplam alkali                          | % 0,54                  |

### 3.1.2 Agregalar

Agrega deneyleri TS 706 EN 12620' ye uygun olarak yapılmıştır. Beton karışımlarında kullanılan agregaların tane yoğunluğu ve su emme oranı TS EN 1097-6 ya uygun olarak yapılmıştır [26]. Elde edilen sonuçlar Tablo 3.7'de gösterilmiştir. Agregada karışımında maksimum dane çapı 22 mm'dir. Agregaların tane boyutları TS EN 933-1' e uygun olarak yapılmıştır. Karışımında %27 oranında kırmataş II, %26 oranında kırmataş I, % 27 oranında kırma kum ve %20 oranında doğal kum kullanılmıştır. Agregalara ait fiziksel özellikler Çizelge 3.2'de, tane boyutu granülometrisi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2:** Agregaların fiziksel özellikleri.

| Agrega Türü | Özgül Ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> ) | Su Emme (%) |
|-------------|-------------------------------------|-------------|
| Doğal Kum   | 2,58                                | 1,3         |
| Kırma Kum   | 2,7                                 | 0,8         |
| Kırmataş I  | 2,72                                | 0,4         |
| Kırmataş II | 2,72                                | 0,4         |



**Şekil 3.1:** Agregaların tane boyutu dağılımı granülometrisi

### 3.1.3 Uçucu kül

Üretimlerde Tunçbilek Termik Santrali'nden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külde SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %70'ten fazla olduğu için ASTM C 618 standartına göre F sınıfı uçucu kül olarak adlandırılır. Ancak uçucu

külün üretildiği kömürün niteliğine göre bakarsak linyit kökenli olduğu için C sınıfı uçucu kül olarak adlandırılır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3:** Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler.

| Kimyasal Bileşimin Tanımı               | Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%) | C Sınıfı Uçucu Küfler için TS EN 450 ve ASTM C 618 | F Sınıfı Uçucu Küller için TS EN 450 ve ASTM C 618 |
|-----------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                        | 57,54                          | -                                                  | -                                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 18,99                          | -                                                  | -                                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | 10,34                          | -                                                  | -                                                  |
| S+A+F                                   | 86,87                          | >50 ASTM C 618                                     | >70 ASTM C 618                                     |
| CaO                                     | 3,79                           | >10 (Yüksek Kireçli) ASTM C 618                    | <10 (Düşük Kireçli) ASTM C 618                     |
| SO <sub>3</sub>                         | 0,66                           | <3TS EN 450                                        | <3TS EN 450                                        |
| Na <sub>2</sub> O                       | 0,17                           | -                                                  | -                                                  |
| K <sub>2</sub> O                        | 1,15                           | -                                                  | -                                                  |
| Na <sub>2</sub> O eş değeri top. Alkali | 0,93                           | -                                                  | -                                                  |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )           | 2,15                           | -                                                  | -                                                  |
| 28 günlük aktivite indeksi              | 85,1                           |                                                    |                                                    |
| 90 günlük aktivite indeksi              | -                              | -                                                  | -                                                  |
| Cl-                                     | 0,0062                         | <0,1TS EN 450                                      | <0,1TS EN 450                                      |
| Kızdırma Kaybı                          | 0,91                           | <5TS EN 450                                        | <5TS EN 450                                        |
| Serbest CaO                             | 0,02                           | <1TS EN 450                                        | <1TS EN 450                                        |
| Hacim Genişlemesi (mm)                  | 1                              | <10TS EN 450                                       | <10TS EN 450                                       |
| 45µm'dan geçen                          | 22,0                           | -                                                  | -                                                  |

### 3.1.4 Silis dumanı

Çalışmada yalnızca UK-SD üretiminde silis dumanı kullanılmıştır. Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri Çizelge 3.4'te gösterilmektedir.

**Çizelge 3.4:** Üretimlerde kullanılan silis dumanının özellikleri.

|                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| SiO <sub>2</sub> oranı | % 94,8                 |
| Özgül ağırlık          | 2207 kg/m <sup>3</sup> |
| Gevşek birim ağırlık   | 617 kg/m <sup>3</sup>  |
| Yüzey alanı            | 20,8 m <sup>2</sup> /g |

### 3.1.5 Kalsit

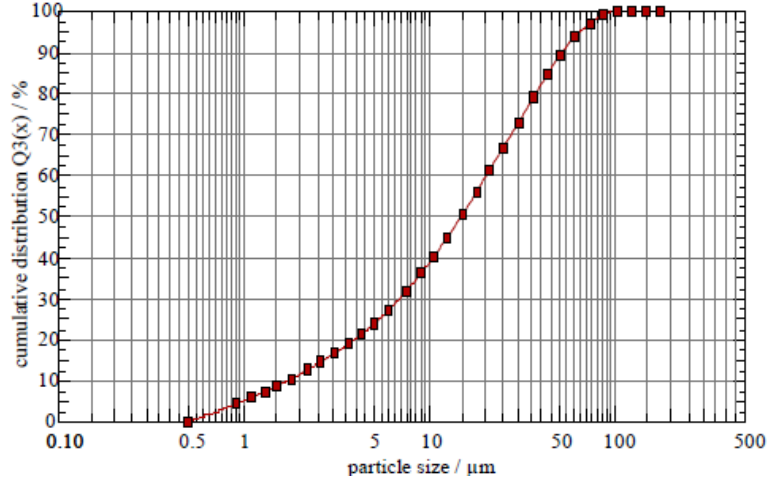
Üretimlerde Mikron'S Mikronize Mineral Endüstrisi A.Ş'nin Niğde fabrikasından getirtilen 20 µm ve 5µm inceliğinde 2 farklı kalsit kullanılmıştır. Üretimlerde kullanılan kalsitin kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te, elek analizi değerleri Çizelge 3.6, Şekil 3.2 ve 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5:** Üretimlerde kullanılan kalsitin kimyasal özellikleri.

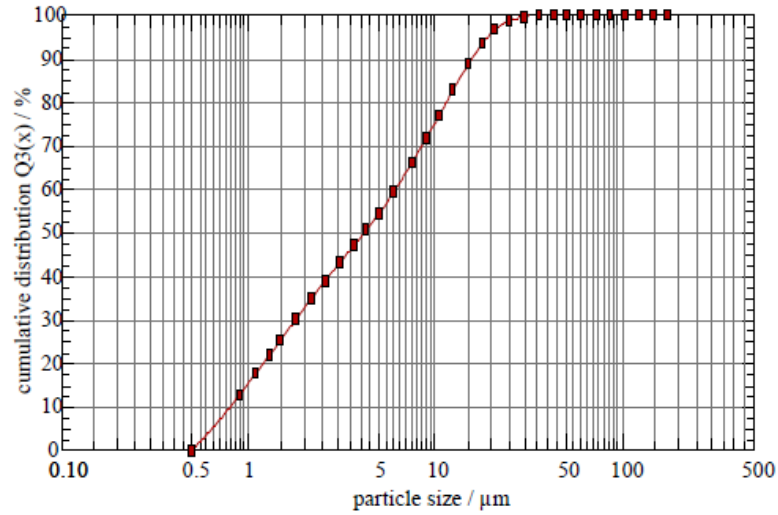
| Kimyasal Bileşimin Tanımı      | Kimyasal Bileşimin Yüzdesi (%) |
|--------------------------------|--------------------------------|
| CaCO <sub>3</sub>              | 99,5                           |
| MgCO <sub>3</sub>              | 0,2                            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,01                           |
| SiO <sub>2</sub>               | 0,01                           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,02                           |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )  | 2,7                            |
| Sertlik (Mohs)                 | 3                              |
| Kırılma indeksi                | 1,59                           |
| pH                             | 9                              |

**Çizelge 3.6:** Üretimlerde kullanılan kalsitin elek analiz değerleri.

|                 | 20 $\mu\text{m}$ | 5 $\mu\text{m}$   |
|-----------------|------------------|-------------------|
| d50(ort. boyut) | 20 $\mu\text{m}$ | 4,5 $\mu\text{m}$ |
| d97(maks boyut) | 85 $\mu\text{m}$ | 28 $\mu\text{m}$  |
| d2(min. boyut)  | 10%              | 28%               |



**Şekil 3.2:** Üretimlerde kullanılan 20  $\mu\text{m}$ 'luk kalsitin elek analizi.



**Şekil 3.3:** Üretimlerde kullanılan 5  $\mu\text{m}$ 'luk kalsitin elek analizi.

### 3.1.6 Karışım suyu

Üretim sürecinde kullanılacak olan suyun özellikleri, betonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Karma suyunda bulunacak olan çeşitli iyonlar, eriyikler ve istenmeyen maddeler, beton işlenebilirliğini, çimentonun priz başlangıç ve sonu sürelerini ve betonun durabilitesini olumsuz

yönde etkiler. Benzer şekilde, kullanılan suyun donatı korozyonuna da yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

Betonun karma suyu ile ilgili olarak TS 500 ve TS 1247 standartlarında birtakım açıklamalar mevcuttur. Belirtilen standartlarda betonarme betonunda kullanılacak karma suyunun pH değerinin %7 yi aşmaması gerektiği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, organik ve inorganik maddelerin varlığı, priz süresini etkilemektedir.

### 3.1.7 Katkı maddeleri

#### 3.1.7.1. Yeni ikinci nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı

Deneylerde kullanılacak olan beton numunelerinin üretimi aşamasında, Basf firmasından sağlanan yeni ikinci nesil bir süperakışkanlaştırıcı olan Glenium Sky 506 ve Grace firması tarafından üretilen ikinci nesil bir süperakışkanlaştırıcı olan Adva 616 M kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltan, betonun kıvam kaybını önleyen yüksek kalitede beton yapım olanağı veren bir kimyasal katkı maddesidir.

Beton üretiminde, bağlayıcılar ve agrega homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldıktan sonra, karışımda belirlenen suyu %90' ı ilave edilmiştir. Kalan suyla beraber, süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi de ilave edilip kısa bir süre daha karıştırılmıştır. Çizelge 3.7'de kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

**Çizelge 3.7:** Kullanılan süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri.

| Malzemenin Yapısı               | Glenium Sky 506       | Adva 616              |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Katı madde içeriği % (EN 480-8) | 45                    | 44                    |
| Yoğunluk                        | 1,1 g/cm <sup>3</sup> | 1,1 g/cm <sup>3</sup> |
| Klor İçeriği % (EN 480-10)      | <0,1                  | <0,1                  |
| Alkali İçeriği % (EN 480-12)    | <3                    | <3                    |
| pH değeri (EN 1008)             | 6                     | 5                     |

#### 3.1.7.2. Hava sürükleyici beton katkısı

Beton üretimleri sırasında, Basf firması tarafından üretilen yağ alkolü ve amonyum tuzu esaslı bir hava sürükleyici beton katkısı olan Micro Air 200 ve Grace firması tarafından üretilen sodyum tuzları içeren Darex Aea-T kullanılmıştır. Beton içerisine

kontrollü hava sürükleyerek kalıcı ve optimum aralıklarla hava kabarcıkları oluşturan ve betonun donma-çözünme döngüsüne karşı dayanıklılığını arttıran, hava sürükleyici beton katkı maddesidir.

Beton üretimi esnasında bağlayıcılar ve agrega homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldıktan sonra, karışımda belirlenen suyu %70' i ilave edilmiştir. Kalan suyla beraber, hava sürükleyici katkı maddesi de ilave edilip kısa bir süre daha karıştırılmıştır. Çizelge 3.8'de kullanılan hava sürükleyici beton katkısına ait teknik özellikler verilmiştir.

**Çizelge 3.8:** Kullanılan hava sürükleyici beton katkısının teknik özellikleri.

| Malzemenin Adı                 | Micro Air 200          | Darex Aea-T            |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| Katı Madde İçeriği % (EN408-8) | 7,2                    | 0,95                   |
| Yoğunluk                       | 1,02 g/cm <sup>3</sup> | 1,00 g/cm <sup>3</sup> |
| Klor İçeriği % (EN 480–10)     | <0,1                   | <0,1                   |
| Alkali İçeriği % (EN 480–12)   | <10                    | <10                    |
| pH Değeri (EN 1008)            | 10,2                   | 5,9                    |

### 3.2 Beton Karışımları ve Numune Kodları

Bu çalışmada laboratuarda iki farklı su/bağlayıcı oranına sahip dört farklı tipte beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kodlanması Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 3.9:** Numune kodları ve açıklaması.

| Numune Kodlaması | Açıklaması                                         |
|------------------|----------------------------------------------------|
| K20              | 20 mikron kalsitli su/bağlayıcı oranı 0,40         |
| UK               | Uçucu küllü su/bağlayıcı oranı 0,40                |
| K20-K5           | 20 ve 5 mikron kalsitli su/bağlayıcı oranı 0,38    |
| UK-SD            | Uçucu kül ve silis dumanlı su/bağlayıcı oranı 0,38 |

Beton karışım hesabı betonların sahip olduğu uçucu kül ile 20 mikronluk kalsitin, silis dumanıyla 5 mikronluk kalsitin hacimsel olarak eş değer şekilde yer değiştirmesi esasına dayanılarak yapılmıştır. Uçucu külle 20 mikronluk kalsitin, silis dumanıyla 5 mikronluk kalsitin aynı bağlayıcılık özelliklerine sahip olduğu kabul

edilmiştir. Silis dumanı %50 oranında sulandırılarak kullanılmıştır. Karışım hesabında K20 ve UK betonlarında C35/40, K20-K5 ve UK-SD betonlarında C40/45 beton dayanım sınıfı seçilmiştir. Çizelge 3.10’da 1 m<sup>3</sup> için gerekli malzeme miktarı kilogram olarak verilmiştir.

**Çizelge 3.10:** Beton karışım dizaynı (1m<sup>3</sup> için gerekli malzeme miktarı).

| <b>Beton Kodu</b>      | <b>K20</b> | <b>UK</b> | <b>K20-K5</b> | <b>UK-SD</b> |
|------------------------|------------|-----------|---------------|--------------|
| Su/Bağlayıcı           | 0,40       | 0,40      | 0,38          | 0,38         |
| Çimento                | 320        | 320       | 275           | 275          |
| Su                     | 146        | 142       | 154           | 103          |
| Doğal Kum              | 332        | 334       | 337           | 360          |
| Kırma Kum              | 466        | 468       | 472           | 500          |
| Kırma Taş-1            | 489        | 492       | 496           | 532          |
| Kırma Taş-2            | 437        | 440       | 444           | 476          |
| Uçucu Kül              | -          | 100       | -             | 50           |
| Silis Dumanı           | -          | -         | -             | 29           |
| Kalsit (20 mikron)     | 126        | -         | 64            | -            |
| Kalsit (5 mikron)      | -          | -         | 57            | -            |
| Süper akışkanlaştırıcı | 2,00       | 2,59      | 1,84          | 4,78         |
| Hava sürükleyici       | 0,666      | 0,828     | 0,155         | 0,495        |

### 3.3 Üretimde İzlenen Sıra

- Agregalar kuru şekilde 30 sn kadar karıştırılır.
- Karışım suyunun %85’i kadarı eklenip 1 dakika daha karıştırılır.
- Betonyer durdurulup karışımın ortası açılır. Açılan bölgeye kalsit veya uçucu kül-çimento konulur. 30 sn daha karıştırılır.
- Kalan karışım suyuyla birlikte akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı karışıma yavaş yavaş eklenir.
- Tüm karışım toplamda 10 dakikayı bulana kadar karıştırılır.
- Taze beton deneyleri yapılır.
- Üretilen beton kalıplara yerleştirilir.

### 3.4 Yapılan Deneyler

#### 3.4.1 Taze beton deneyleri

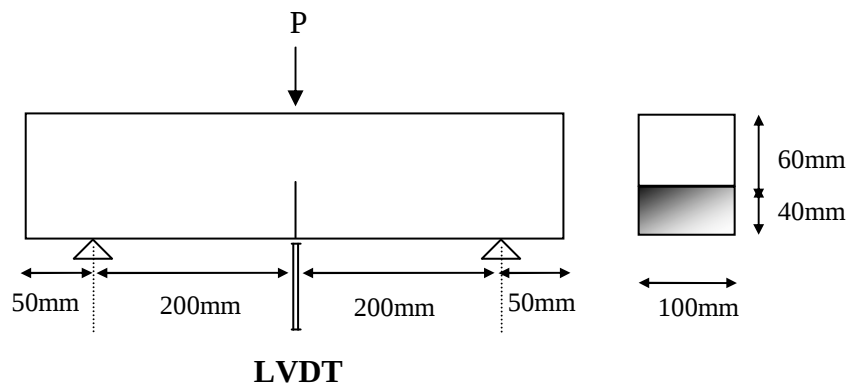
Sertleşmekte olan betonun, görünen aktivasyon enerjisinin ölçülmesi öncesinde, taze beton deneyleriyle numunelerin, hedeflenen özellikleri taşıyıp taşımadıkları belirlenmiştir. Bu kapsamda çökme, hava içeriği ve birim ağırlık deneyleri her karışım için de ayrı ayrı yapılmıştır. Hava içeriği hem toplam hava boşluğunu ölçen taze beton hava ölçer cihazı ile hem de sürüklenmiş hava boşluklarını ( $2\text{mm} \geq$ ) ölçen Germann Instrumetns'a ait AVA cihazı ile ölçülmüştür.

#### 3.4.2 Basıç dayanımı , yarma dayanımı ve elastisite modülü gelişimi

Bu karışımlardan dayanım gelişimini belirleyebilmek için her karışım için 45'er adet  $d = 150\text{mm}$ ,  $h = 300\text{mm}$ ' lik silindir numune üretilmiştir. Üretilen silindirlerde 0,5.- 1.- 3.-7. ve 28. günlerde basınç, yarma ve elastisite modülü deneyleri yapılmıştır.

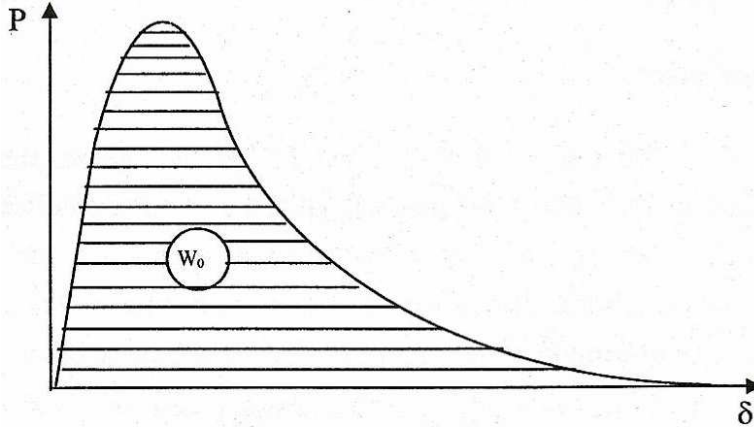
#### 3.4.3 Kırılma enerjisinin belirlenmesi

Kırılma enerjilerini karşılaştırabilmek için her karışımdan 12'şer adet  $50 \times 10 \times 10$  cm boyutlarında kirişler üretilmiş, bu kirişler üzerinde 1.-3.-7. ve 28. günlerde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler elmas testere ile kesilerek 4 cm'lik bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının  $6 \times 10$  cm olması sağlanmıştır. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulanmıştır. Yükleme hızı 0,02 mm/dak. olarak uygulanmıştır. Kirişin ortasına yerleştirilen 1 adet LVDT ile sehim ölçülmüş ve her bir kiriş numune için yük-orta noktadaki sehim eğrisi elde edilmiştir. Çentikli kiriş numune için eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.4'te gösterilmektedir [82].



Şekil 3.4:Üç noktalı eğilme deney düzeneği.

Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan RILEM-50 FMC'nin önerisine uygun olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.5'te örnek bir yük-sehim eğrisi görülmekte ve kırılma enerjisinin nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.



**Şekil 3.5:** Örnek yük-sehim eğrisi.

$$G_F = (W_0 + mgd_0) / A_{lig} \quad (N/m) \quad (3.1)$$

$W_0$  = Yük-Sehim eğrisi altında kalan alan

$m$  = Kirişin mesnetler arasında kalan ağırlığı (kg)

$g$  = Yer çekimi ivmesi ( $9,81 \text{ m/sn}^2$ )

$d_0$  = Kirişin göçme sırasında deformasyonu (m)

$A_{lig}$  = Etkin kesit alanı ( $\text{m}^2$ )

Numunelerin eğilme dayanımları aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$F_{net} = (3PL) / 2 BD^2 \quad (3.2)$$

$F_{net}$  = Net eğilme dayanımı

$P$  = Kırılma yükü (N)

$L$  = Mesnetler arası uzaklık (mm)

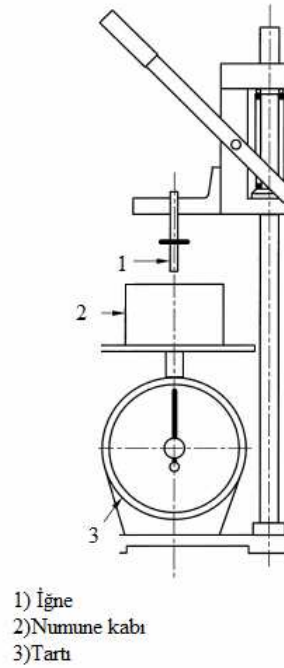
$B$  = Numune kesitinin genişliği (mm)

$D$  = Numune kesitinin yüksekliği (mm)

#### 3.4.4 Priz süresinin belirlenmesi

Priz süresinin belirlenebilmesi için BS EN 13294 standartında belirtildiği gibi bir düzenek kurulur. Üretilen beton 5mm'lik elekten elenir. Geçen malzeme bir kaba

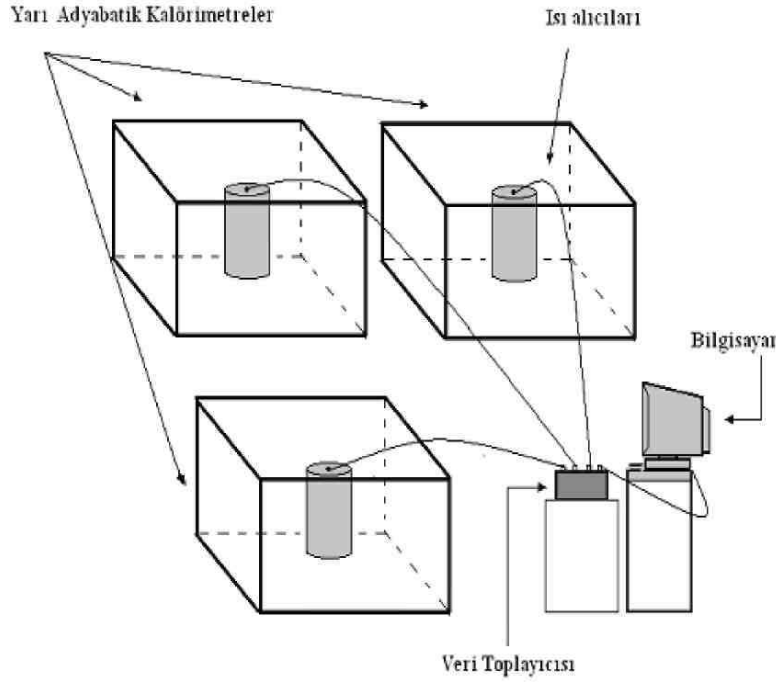
konulur ve 20°C’de bir süre saklanır. Darası tartılan numuneye tartı üzerindeyken iğne batırılır ve tartıdan okunan ağırlık değeri kaydedilir. Bu ölçümler 1 N/mm<sup>2</sup>’ye kadar saatte bir kez, 1 N/mm<sup>2</sup>’den 4 N/mm<sup>2</sup>’ye kadar yarım saatte bir olmak üzere tekrarlanır. Priz başlangıç zamanı olarak 0.5 N/mm<sup>2</sup>, bitişi olarak 3.5 N/mm<sup>2</sup> kabul edilir ve bu değerlere karşılık gelen zaman değerleri interpolasyon yöntemiyle bulunur. Bulunan değer en yakın 15. dakikaya yuvarlanır. Şematik deney düzeneği Şekil 3.6’da gösterilmiştir [83].



**Şekil 3.6:** Priz süresi tayini deney düzeneği.

#### 3.4.5 Yarı adyabatik sıcaklık değişiminin belirlenmesi

Sertleşmekte olan betonun ısı gelişimini takip etmek için her karışım tipinden birer adet numune üzerinde NT BUILD 388’de belirtildiği gibi deney yapılmıştır. Tümüyle ısı kayıplarından izole edilmiş ve sıcaklığı 20°C’ de sabitlenmiş bir odaya yerleştirilen yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi, Şekil 3.7’de verilmiştir [84].



**Şekil 3.7:** Yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi.

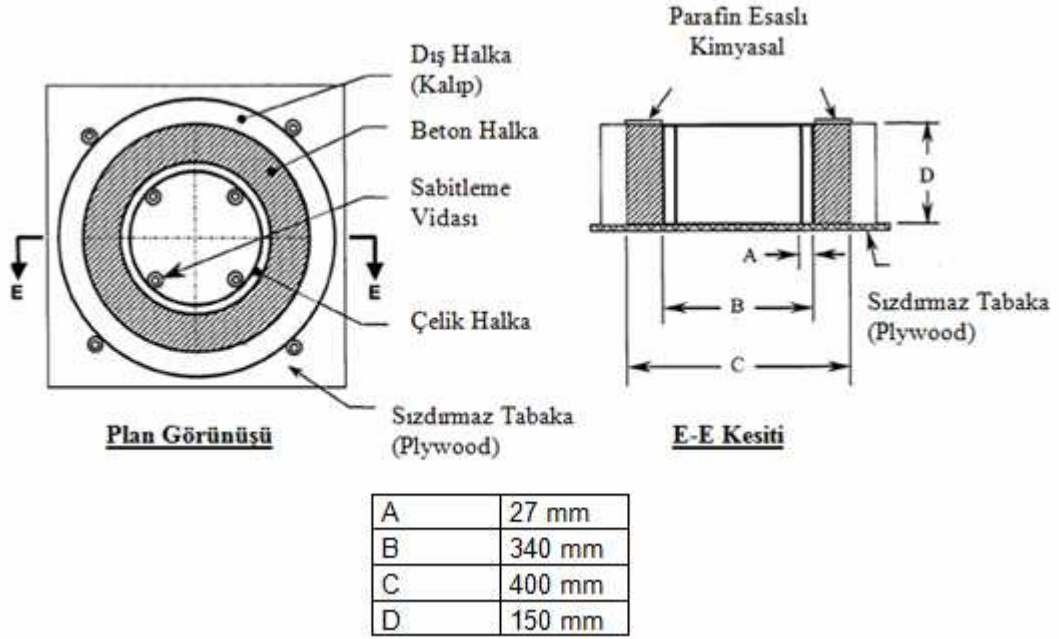
Taze beton numuneler, kalıplara döküldükten sonra, kalorimetrelere yerleştirilmiştir. Betondaki çimentonun hidratasyonu sonucunda, artan sıcaklıklar 10 ve 30dk' lık zaman dilimleri sonunda, 15 gün boyunca, numune sıcaklıkları 20° C' ye gelene kadar, alıcılar tarafından toplanmış ve veri toplayıcısına iletilmiştir. Bir bilgisayara bağlanmış olan veri toplayıcısı, alıcılardan topladığı verileri bilgisayara iletmıştır.

#### 3.4.6 Çökme, yayılma, taze birim ağırlık ve hava kaybının belirlenmesi

Taze beton üzerinde TS EN 12350'de belirtildiği gibi 0., 30., 60. ve 90. dakikalarda çökme, yayılma, birim ağırlık değerleri ve 50 cm'e yayıldığı süre ölçülmüştür. Ayrıca 0. ve 90. dakikalarda Air Void Analyzer (AVA) tarafından taze beton içerisindeki sürüklenmiş hava ölçülmüştür. Bu sayede üretilen her tip betonda bu değerlerdeki değişim gözlenmiştir.

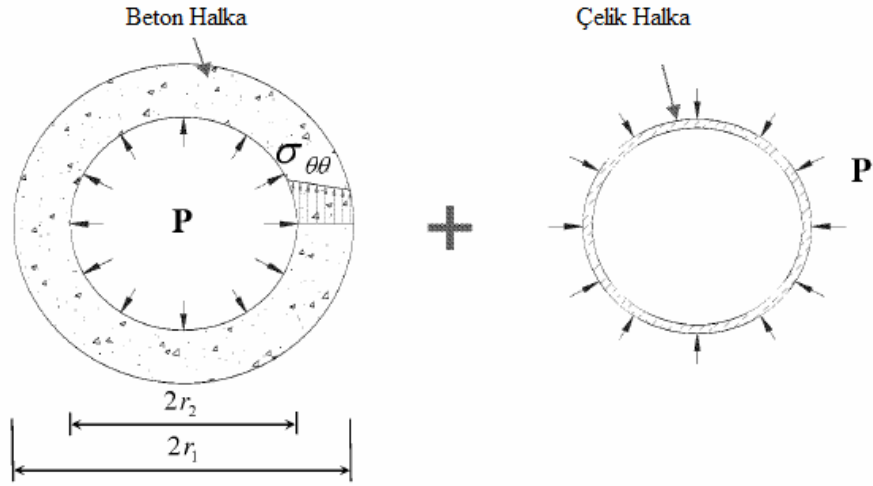
#### 3.4.7 Kısıtlanmış rötre deneyi – halka testi

Bu deney ASTM C 1581-04 esaslarına göre yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.8'de gösterildiği gibi sızdırmaz bir tabakanın üzerine önce çelik bir halka yerleştiriliyor ve daha sonra bu çelik halkanın dışına kalıp görevi görmesi için başka bir çelik halka merkezleri bir olacak şekilde yerleştiriliyor. İçten ve dıştan sabitleme vidaları yardımıyla sızdırmaz tabakaya monte ediliyor [85].



**Şekil 3.8:** Halka testi deney düzeneği.

Bu çalışmada üretilen her tip beton bu deneye tabi tutuldu. Standardın belirlediği özelliklerden biri olan en fazla dane çapı 14 mm olmalıdır şartını sağlayabilmek için dizaynlarda bulunan kırma taş-2 agregası 14 mm'lik elekten elenerek beton karışımına konuldu ve daha sonra kalıplara dolduruldu. Her karışım için ikişer tane halka kalıbı dolduruldu ve sıcaklığı 40°C' ye sabitlenmiş nemi %15 olan özel bir odaya konuldu ve betonun üst yüzden su kaybını engellemek için üst bölümü parafin esaslı bir kimyasal ile kapatıldı. Dökümden 24 saat sonra dıştaki çelik kalıp söküldü ve çatlak oluşumu gözlendi. Beton büzölmeye çalıştığı için Şekil 3.9'da görüldüğü çelik halkaya dıştan bir basınç uygulayacak, çelik halka ise çok az şekil değiştirmekte ve bunun sonucunda betonun şekil değiştirmesini engellemekte ve betona içten basınç uygulamaktadır.



**Şekil 3.9:** Beton halka ile çelik halka arasındaki gerilmeler.

### 3.5 Kür Programı

Ring deneyinde kullanılan numunler hariç diğer bütün deney numuneleri 20°C sabit sıcaklığa ve %100 nem koşuluna sahip kür odasında saklandı. Ring numuneleri 40°C'lik kür odasında saklandı.

## **4. DENEY SONUÇLARI**

### **4.1 Taze Beton Deney Sonuçları**

#### **4.1.1 Çökme deneyi**

Çökme deneyi, TS EN 12350–2 ‘ye göre yapılmaktadır [86]. Üst çapı 10cm, alt çapı 20cm ve yüksekliği 30 cm olan Abrams konisi kullanılır. Karılmış olan taze beton, üç tabaka halinde koninin içerisine yerleştirilir. Her bir tabaka, çapı 16mm olan özel deney çubuğu ile 25’ er kez şişlenerek betonun sıkışması sağlanır. Koni doldurulduğu zaman üzeri mala ile düzeltilir. Bu işlemten sonra, koni yavaşça çekilerek içerisindeki taze betonun kendi ağırlığı ile çökmesi sağlanır. Taze betonun ilk yüksekliği ile koni çekildikten sonraki yüksekliği arasındaki fark mm cinsinden ölçülmek suretiyle çökme değeri belirlenir. Çökme deneyine ait sonuçlar, Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

#### **4.1.2 Yayılma tablası deneyi**

Yayılma tablası deneyi, TS EN 12350–5 ‘e göre yapılmaktadır [86]. 700x700 mm’lik tablanın merkezine Abrams konisi yerleştirilir. Çökme deneyinde olduğu gibi beton Abrams konisine yerleştirilir. Koni çekildikten sonra betonun yayıldığı çap birbirine dik iki doğrultuda ölçülür ve yayılma değeri belirlenir. Yayılma tablası deneyine ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

#### **4.1.3 Birim ağırlık deneyi**

Birim ağırlık deneyi, TS EN 12350–6 ‘ya göre yapılmaktadır [86]. Beton hacmi ve darası bilenen bir kaba her aşamada 25 kez şişleme yapılarak üç aşamada yerleştirilir. Sıkışmış hava boşlukların çıkması için tokmaklanır. Beton yüzeyi tesviye edilir ve tartım sonucunda birim ağırlık standartta belirtildiği gibi hesaplanır. Birim ağırlık deneyine ait değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

#### 4.1.4 Hava içeriği deneyi

Hava içeriği deneyi, TS EN 12350-7’ de kabul edilen su sütunu metoduna göre yapılmaktadır [86]. Su sızdırmaz kap içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş, belirli hacimdeki taze beton üzerine, önceden belirlenmiş yüksekliğe kadar su ilave edilir ve su üzerine önceden belirlenmiş hava basıncı uygulanır. Taze beton numunesi içerisinde bulunan hava hacminde, sıkışma nedeniyle meydana gelen azalma, beton içerisindeki hava yüzdesine göre kalibre edilmiş su sütununun, seviyesindeki düşme miktarı gözlenerek ölçülür. Hava içeriği deneyine ait sonuçlar, Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

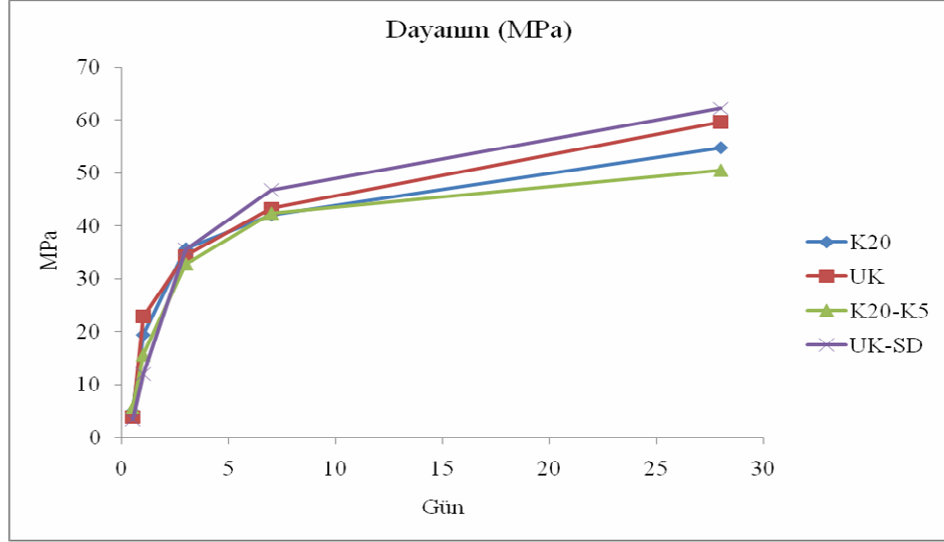
**Çizelge 4.1:** Taze beton deneylerinden elde edilen sonuçlar.

| Numune Kodu | Çökme (cm) | Yayılma (cm) | Taze Birim Ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ ) | Hava İçeriği (%) | Beton Sıcaklığı ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|-------------|------------|--------------|----------------------------------------|------------------|----------------------------------------|
| K20         | 23         | 54           | 2277                                   | 7                | 20,2                                   |
| UK          | 23         | 60           | 2200                                   | 6,9              | 21,4                                   |
| K20-K5      | 23         | 49           | 2293                                   | 6,5              | 22,4                                   |
| UK-SD       | 24         | 57           | 2322                                   | 5,8              | 24,2                                   |

#### 4.2 Mekanik Deney Sonuçları

##### 4.2.1 Basıç dayanımı gelişimi

Basınc deneyleri, ölçüleri  $\Phi = 150$  ve  $h = 300\text{mm}$ ’ lik silindir numuneler üzerinde 2000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak TS EN 12390-3’e göre yapılmıştır [87]. Üretilen betonlar 0.5-1.-3.-7. ve 28. günlerde teste tabi tutulmuş ve her seri için basınc dayanımı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.1’de basınc dayanım grafiği verilmiştir.

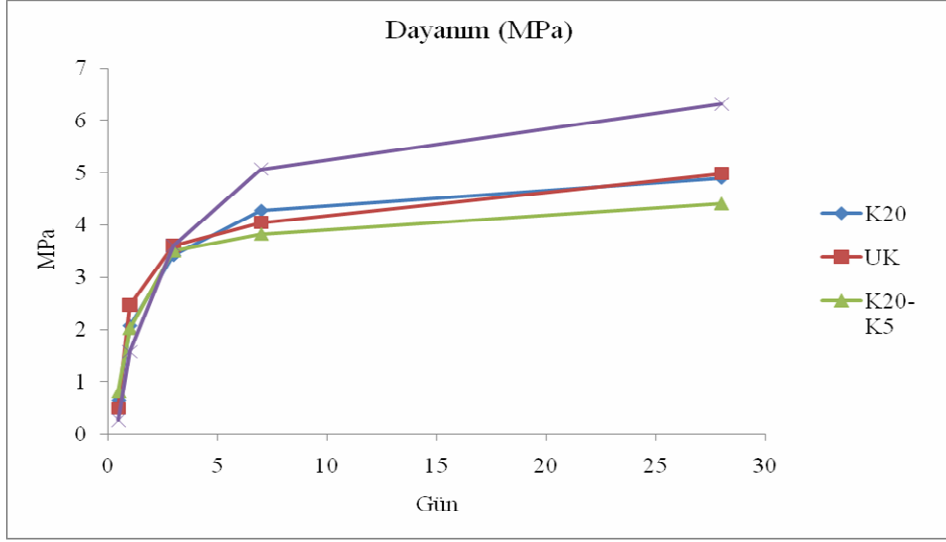


**Şekil 4.1:** Karşılaştırmalı basınç dayanımı grafiği.

Erken yaş dayanımına bakıldığında ilk günlerde K20 ve K20-K5 'in daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Üçüncü günden itibaren UK ve UK-SD hızla dayanım kazanıp daha yüksek dayanıma sahip olmaktadır. 28. gün sonunda en yüksek dayanıma UK-SD sahip olmuştur. Yapılan eski çalışmalarda da görülen puzolanik etki burda da gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve silis dumanı içeren numuneler erken yaş dayanımında düşük değerlere sahipken ilerleyen yaşlarda daha yüksek dayanıma sahip olmuşlardır. Tüm betonlar hesap dayanımı değerlerine 7 günde ulaşmışlardır.

#### 4.2.2 Yarma dayanımı gelişimi

Yarma deneyleri, ölçüleri  $\Phi = 150$  ve  $h = 300\text{mm}$ ' lik silindir numuneler üzerinde 2000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak TS EN 12390-6'ya göre yapılmıştır [87]. Üretilen betonlar 0.5-1.-3.-7. ve 28. günlerde teste tabi tutulmuş ve her seri için yarma dayanımı değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.2'de yarma dayanım grafiği verilmiştir.

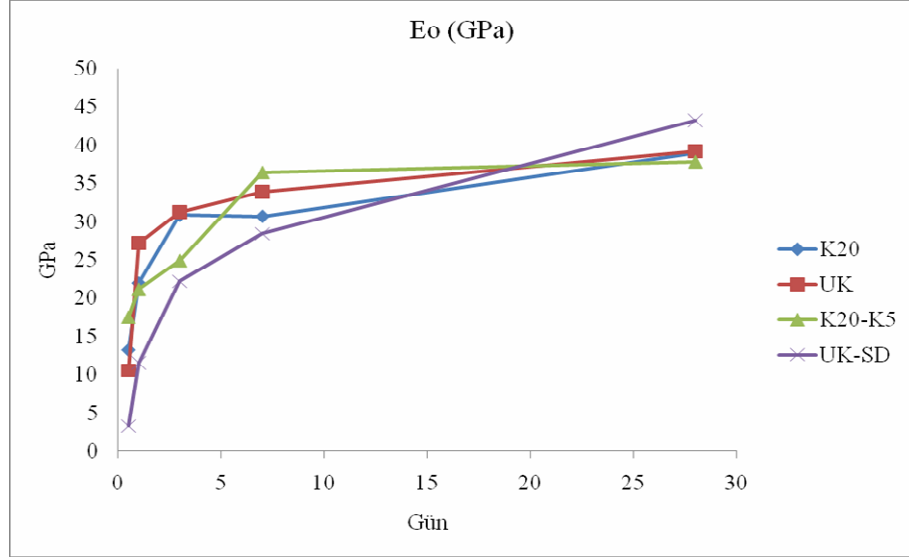


**Şekil 4.2:** Karşılaştırmalı yarma dayanımı grafiği.

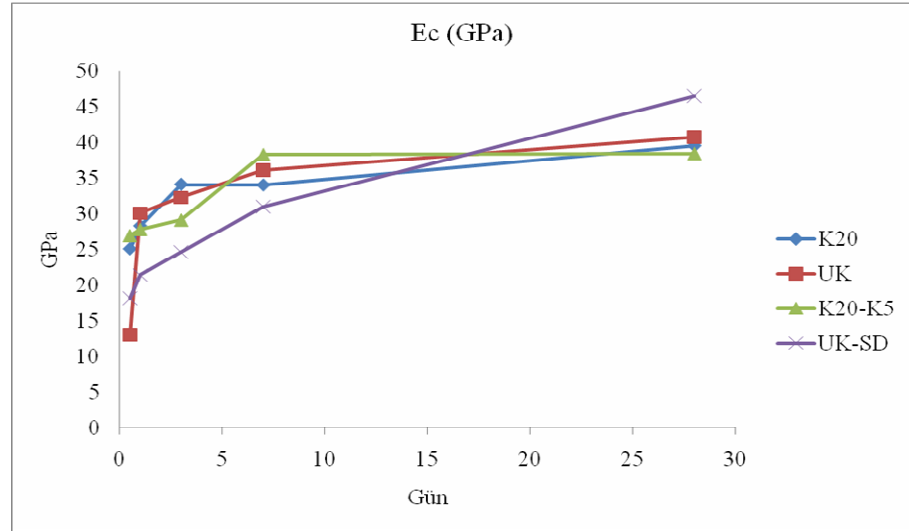
Basınç dayanımında görülen durumun aynısı yarma dayanımında da gözlenmektedir. Erken yaş dayanımına bakıldığında ilk günlerde K20 ve K20-K5 'in daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmektedir. Üçüncü günden itibaren UK K20'yi, UK-SD de K20-K5'i dayanım olarak geçerek hızla dayanım kazanıp daha yüksek dayanıma sahip olmaktadır. 28. gün sonunda en yüksek dayanıma UK-SD sahip olmuştur. Uçucu kül ve silis dumanı içeren numuneler erken yaş dayanımında düşük değerlere sahipken ilerleyen yaşlarda daha yüksek dayanıma sahip olmuşlardır.

#### 4.2.3 Elastisite modülü gelişimi

Elastisite modülü deneyleri, ölçüleri  $\Phi = 150$  ve  $h = 300\text{mm}$ ' lik silindir numuneler üzerinde 2000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak NT BUILD 205'e göre yapılmıştır [88]. Üretilen betonlar 0.5-1.-3.-7. ve 28. günlerde teste tabi tutulmuş ve her seri için elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.3 ve 4.4'te  $E_o$  ve  $E_c$  grafikleri verilmiştir.



**Şekil 4.3:** Karşılaştırmalı Eo grafiği.



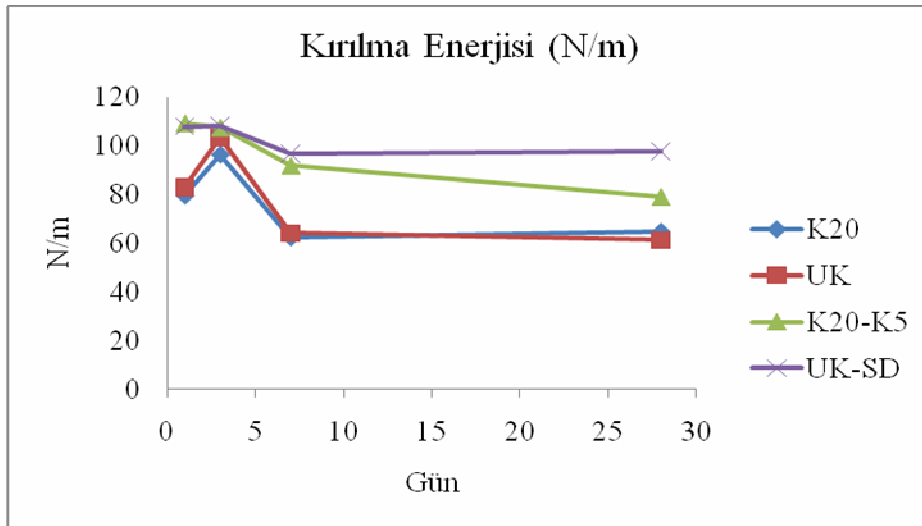
**Şekil 4.4:** Karşılaştırmalı Ec grafiği.

Erken yaştaki Eo gelişimi göz önüne alınırsa 1. günden itibaren en yüksek elastisite modülüne UK kodlu uçucu küllü numune sahiptir. Ancak 28. günde en yüksek değere UK-SD kodlu silis dumanlı numune ulaşmıştır. UK-SD erken yaşlarda diğer numunelere oranla çok düşük değere sahipken ilerleyen yaşlarla birlikte hızlı bir gelişim gösterip 28. günde en yüksek değeri almıştır. 28. gün sonunda K20, UK ve K20-K5 birbirine yakın değerler almıştır.

Eğer Ec gelişimi dikkate alınırsa K20 ve K20-K5 kodlu kalsitli numuneler yarım günde en yüksek değerlere sahipken 1. günden itibaren UK en yüksek değeri almıştır. Eo gelişimine benzer şekilde 28. gün sonunda UK-SD en yüksek değere sahip olmuştur. 28. gün sonunda K20, UK ve K20-K5 birbirine yakın değerler almıştır.

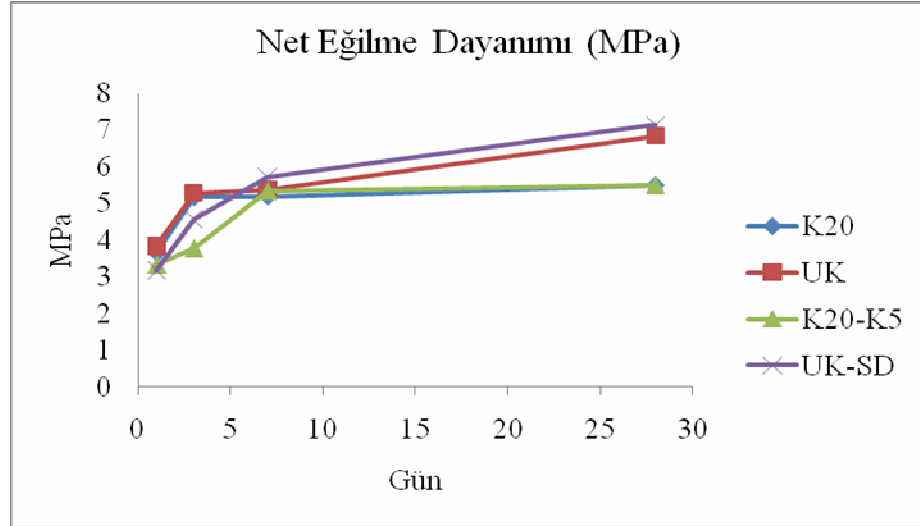
### 4.3 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjilerini karşılaştırmak için her karışımdan 12’şer adet 50x10x10 cm boyutlarında kirişler üretilmiş, bu kirişler üzerinde 1.-3.-7. ve 28. günlerde üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Numuneler elmas testere ile kesilerek 4 cm’lik bir çentik açılmış ve etkin kesit alanının 6x10 cm olması sağlanmıştır. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulanmıştır. Yükleme hızı 0,02 mm/dak. olarak uygulanmıştır. Kirişin ortasına yerleştirilen 1 adet LVDT ile sehim ölçülmüş ve her bir kiriş numune için yük–orta noktadaki sehim eğrisi elde edilmiştir. Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan RILEM-50 FMC’nin önerisine uygun olarak hesaplanmıştır [82]. Şekil 4.5’te karşılaştırmalı kırılma enerjisi grafiği, Şekil 4.6’da karşılaştırmalı net eğilme dayanımı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.5: Karşılaştırmalı kırılma enerjisi grafiği.

Erken yaşlarda en yüksek enerjiye K20-K5 ve UK-SD sahipken 28. gün sonunda en yüksek kırılma enerjisine UK-SD sahip olmuştur. Sadece K20-K5’te 1. günden 3. güne geçişte azalma görülmüştür. Diğer numunelerin hepsinde bu zaman zarfında artış görülmüştür. K20-K5 hariç tüm numuneler en yüksek kırılma enerjisi değerlerine 3. günde ulaşmışlardır. Tüm numunelerde 3. günden sonra kırılma enerjisinde azalma görülmektedir. K20 ve UK 28. günde en düşük kırılma enerjisine sahip olmuştur.

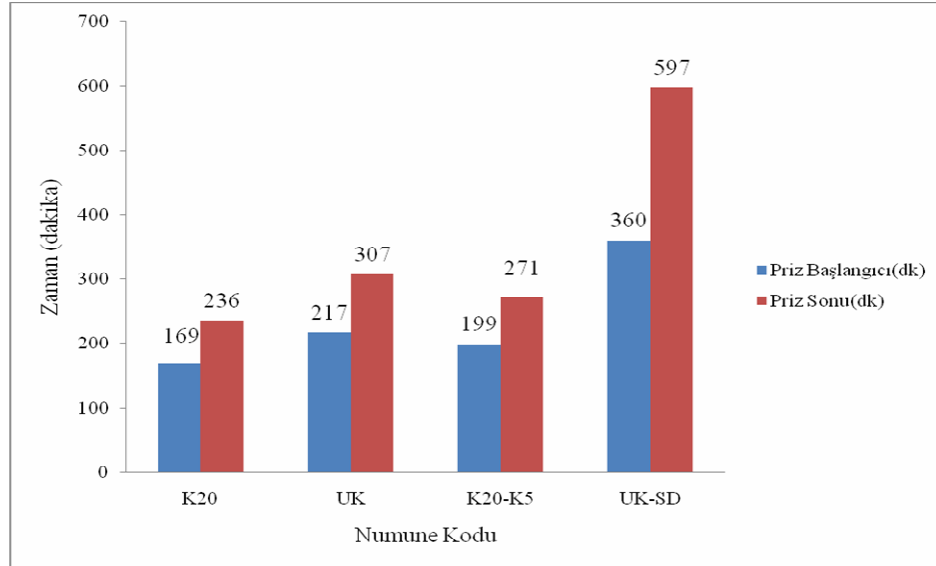


**Şekil 4.6:** Karşılaştırmalı net eğilme dayanımı grafiği.

Net eğilme dayanımı değerinde 1. ve 3. günlerde UK numunesi en yüksek dayanıma sahipken 7. ve 28. günlerde UK-SD numunesi en yüksek dayanıma ulaşmıştır. 28 gün sonunda en düşük dayanıma K20-K5 numunesi sahip olmuştur.

#### 4.4 Priz Süresinin Belirlenmesi

Priz süresinin belirlenmesi için her karışımdan BS EN 13294'e göre alınan numuneler üzerinde yapılan [83] deney sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir.



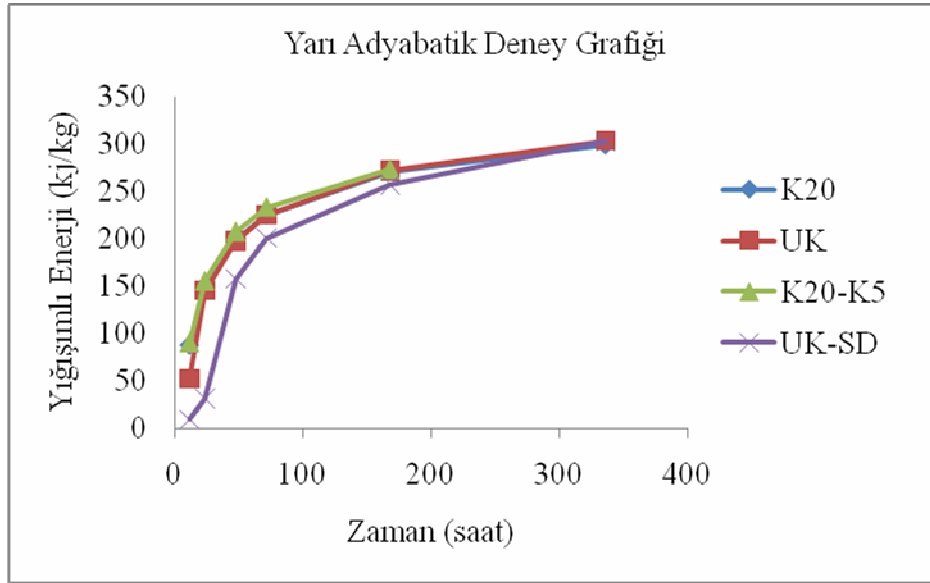
**Şekil 4.7:** Karşılaştırmalı priz başlangıcı ve priz sonu grafiği.

En erken priz başlangıcı ve priz sonu değerine K20 kodlu numune sahip olmuştur. Bu numuneyi K20-K5 kodlu numune izlemiştir. Burdan çıkarılacak sonuç uçucu kül ve silis dumanının prizi yavaşlatıcı bir etkisi olduğudur. Silis dumanı eklenmiş

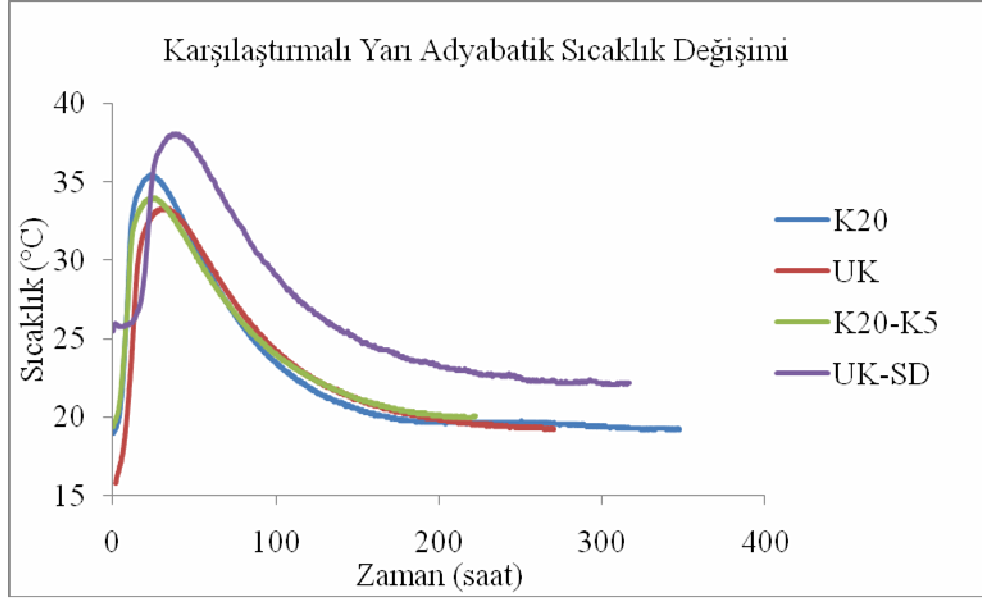
numunenin yalnızca uçucu kül içeren numuneden, 5 mikron kalsit içeren numunenin 20 mikron kalsit içeren numuneden daha geç priz almaya başlaması beton içinde kullanılan malzeme ne kadar incelirse priz süresinin o kadar geciktiğini göstermektedir.

#### 4.5 Yarı Adyabatik Sıcaklık Değişimi

NT BUILD 388'e göre yapılan yarı adyabatik sıcaklık değişimi deneyleri sonucunda numuneleri yığılmalı enerji açısından inceleyecek olursak; K20, UK ve K20-K5 numunelerinin birbirine yakın değerler aldığını görürüz. UK-SD numunesi 14. gün sonunda diğer numunelere yakın değer almıştır. Bu deney sonucunda uçucu küle göre kalsitin yığılmalı enerji açısından betona olumlu veya olumsuz bir etkisinin olmadığı, ancak silis dumanıyla karşılaştırıldığında 14. güne kadar daha yüksek değerler aldığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.8: Yığılmalı yarı adyabatik deney grafiği.



**Şekil 4.9:** Karşılaştırmalı yarı adyabatik sıcaklık değişimi grafiği.

#### 4.6 Çökme, Yayılma, Birim Ağırlık ve Hava İçeriği Kaybının Belirlenmesi

Her beton tipi için TS EN 12350’de tarif edildiği gibi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği deneyleri yapılmıştır. Çökme, yayılma ve birim ağırlık deneyleri 0., 30., 60. ve 90. dakikalarda tekrarlanmıştır. Deneylere ait değerler Çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5’te verilmiştir. Hava içeriği deneyi ise 0. dakikada TS EN 12350-7’de belirtildiği gibi ve Air Void Analyzer (AVA) ile 90. dakikada yalnız Ava ile yapılmıştır.

Çökme kaybının en fazla görüldüğü beton tipleri K20-K5 ve UK-SD olmuştur. Bunu daha ince malzeme içermelerine, K20 ve UK’da kullanılan farklı bir katkı kullanıldığı için kullanılan kimyasal katkının etkinliğine bağlayabiliriz. UK betonunda ise neredeyse hiç çökme kaybına rastlanmamıştır. Bu durumda K20 ile UK’yi karşılaştıracak olursak betona uçucu kül yerine kalsit eklememiz çökme kaybı oluşmasına neden olmaktadır. Ancak çökme kaybında beton üretiminde kullanılan akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı tiplerinin de etkisi olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü aynı katkılarda üretilen K20-K5 ve UK-SD betonlarına baktığımızda her ikisinde de belirli oranlarda çökme kaybı yaşandığı görülmektedir.

**Çizelge 4.2:** K20 numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği.

|                                   | K20  |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Dakika                            | 0    | 30   | 60   | 90   |
| Slump(cm)                         | 23   | 23   | 20   | 16   |
| Yayılma(cm)                       | 46   | 45   | 40   | -    |
| T <sub>50</sub> (sn)              | 10   | 12   | -    | -    |
| Birim Ağırlık(kg/m <sup>3</sup> ) | 2250 | 2336 | 2369 | 2387 |
| Hava(%)                           | 7,8  |      |      |      |
| Hava (%) (AVA)                    | 7,9  |      |      | 3,5  |
| Beton Sıcaklığı(°C)               | 20,2 |      |      |      |

**Çizelge 4.3:** UK numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği.

|                                   | UK   |      |      |      |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| Dakika                            | 0    | 30   | 60   | 90   |
| Slump(cm)                         | 25   | 25   | 25   | 24   |
| Yayılma(cm)                       | 64   | 65   | 63   | 59   |
| T <sub>50</sub> (sn)              | 7    | 9    | 12   | 14   |
| Birim Ağırlık(kg/m <sup>3</sup> ) | 2225 | 2325 | 2389 | 2409 |
| Hava(%)                           | 6,9  |      |      |      |
| Hava (%) (AVA)                    | 5,0  |      |      | 3,0  |
| Beton Sıcaklığı(°C)               | 22,8 |      |      |      |

Yayılma kaybına bakıldığında K20 betonunda 90. dakikada yayılma değeri ölçülememiştir. K20-K5 ve UK-SD'de de yayılma kaybı büyük oranda gözlemlenmiştir. UK betonunda ise çökmeye benzer şekilde yayılma kaybı diğer betonlara oranla az olmuştur. K20, K20-K5 ve UK-SD'yi karşılaştırdığımızda K20-K5 ve UK-SD'de 90. dakikada yayılma gözlemleyebilmeyi daha fazla ince malzeye sahip olmalarına bağlayabiliriz. Beton içerisindeki malzemenin inceliğinin fazla olmasının viskoziteyi artırıcı bir etkisi olduğunu burda da gözlemleyebiliriz. Yine K20 ile aynı katkıları kullanarak ürettiğimiz UK'yi karşılaştırdığımızda uçucu kül yerine konulan kalsitin yayılma kaybına sebep olduğunu görüyoruz. Ancak aynı şeyi K20-K5 ve UK-SD karşılaştırdığımızda söyleyemeyeceğimiz için kullanılan katkı tipinin kalsitli betonların işlenebilme özelliklerine doğrudan etki ettiğini söyleyebiliriz.

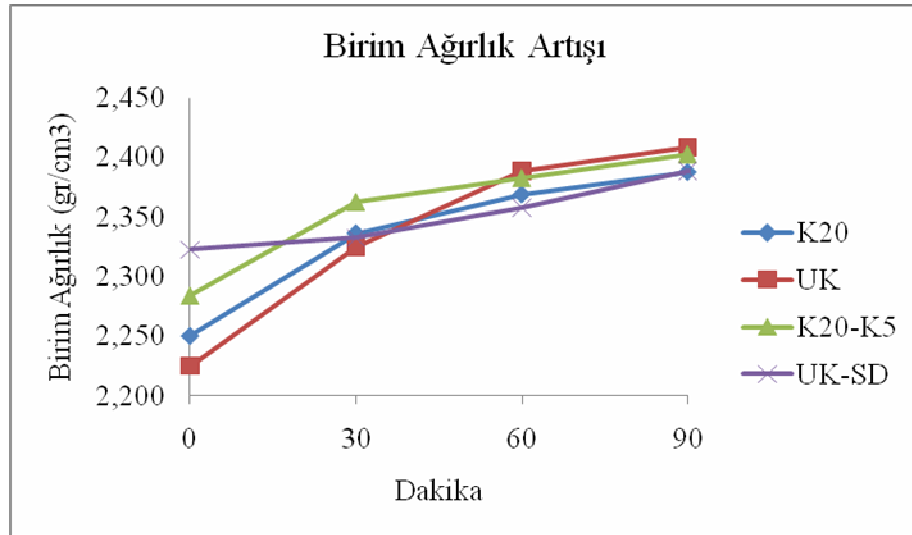
**Çizelge 4.4:** K20-K5 numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği.

|                                   | K20-K5 |      |      |      |
|-----------------------------------|--------|------|------|------|
| Dakika                            | 0      | 30   | 60   | 90   |
| Slump(cm)                         | 24     | 21   | 20   | 17   |
| Yayılma(cm)                       | 58     | 50   | 40   | 37   |
| T <sub>50</sub> (sn)              | 7      | 12   | -    | -    |
| Birim Ağırlık(kg/m <sup>3</sup> ) | 2284   | 2362 | 2382 | 2402 |
| Hava(%)                           | 6,4    |      |      |      |
| Hava (%) (AVA)                    | 4,8    |      |      | 4,0  |
| Beton Sıcaklığı(°C)               | 20,4   |      |      |      |

**Çizelge 4.5:** UK-SD numunesi çökme, yayılma, birim ağırlık ve hava içeriği.

|                                   | UK-SD |      |      |      |
|-----------------------------------|-------|------|------|------|
| Dakika                            | 0     | 30   | 60   | 90   |
| Slump(cm)                         | 24    | 18   | 18   | 17   |
| Yayılma(cm)                       | 63    | 43   | 40   | 35   |
| T <sub>50</sub> (sn)              | 5     | 19   | -    | -    |
| Birim Ağırlık(kg/m <sup>3</sup> ) | 2322  | 2332 | 2357 | 2389 |
| Hava(%)                           | 5,4   |      |      |      |
| Hava (%) (AVA)                    | 4,6   |      |      | 2,5  |
| Beton Sıcaklığı(°C)               | 20,5  |      |      |      |

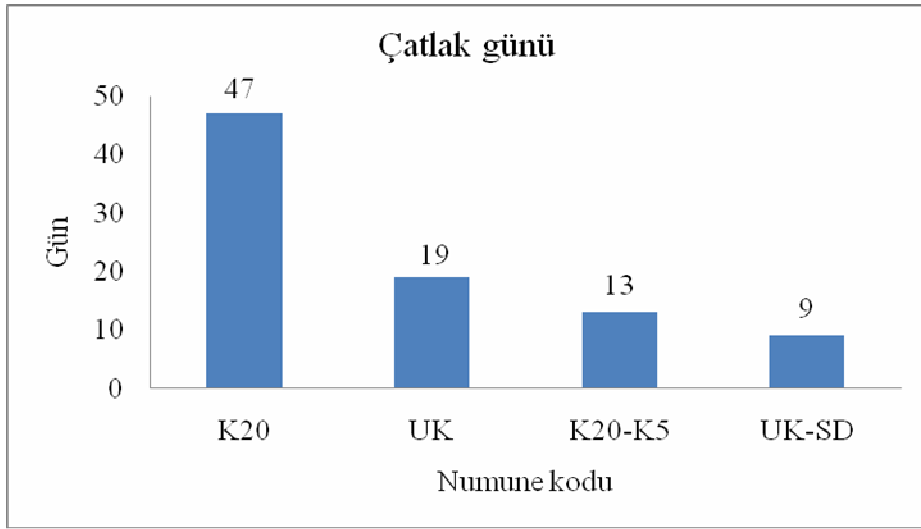
Birim ağırlık artışına baktığımızda en fazla artışın UK betonunda, en az artışın ise UK-SD betonunda olduğunu görmekteyiz.



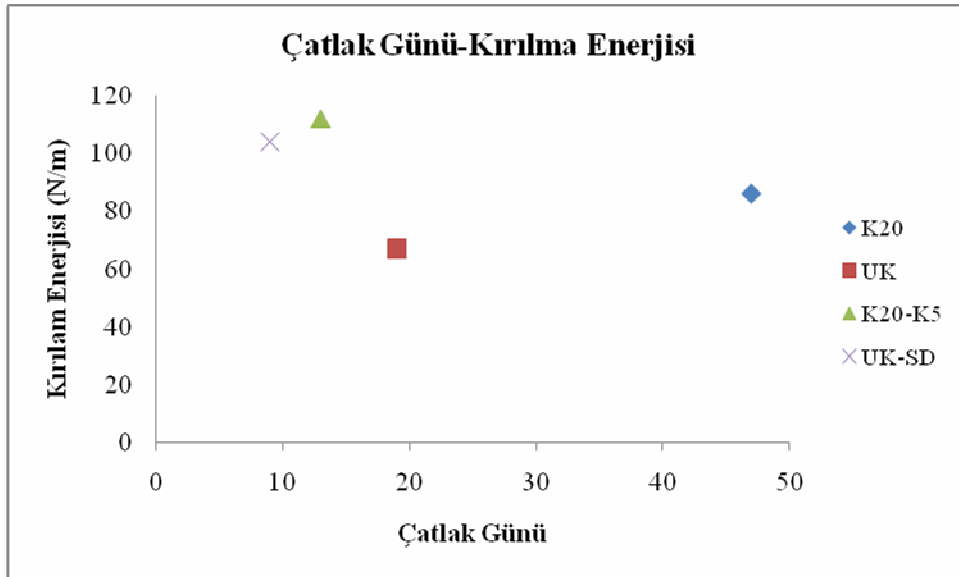
**Şekil 4.10:** Birim ağırlık artış grafiği.

#### 4.7 Kısıtlanmış Rötre Deneyi – Halka Testi

Halka testi ASTM C 1581-04'e göre yapıldı. Şekil 4.11'de numunelerin çatlak günü grafiği, Şekil 4.12'de çatlak günü-kırılma enerjisi karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Bu deneyde rötre çatlağı oluşumunda kullanılan malzemelerin inceliğinin etkin olduğunu gözlemliyoruz. Kullanılan malzemenin inceliği arttıkça, ince malzemenin boşluk doldurma özelliğinden ötürü, çatlak riskinin de arttığı görülmüştür. Ayrıca kalsitin karma suyunu bünyesinde daha uzun süre tutarak betonun rötre yapabilme kapasitesini arttırdığı da söylenebilir.



Şekil 4.11: Halka testi çatlak günü grafiği.



Şekil 4.12: Çatlak günü-kırılma enerjisi grafiği.

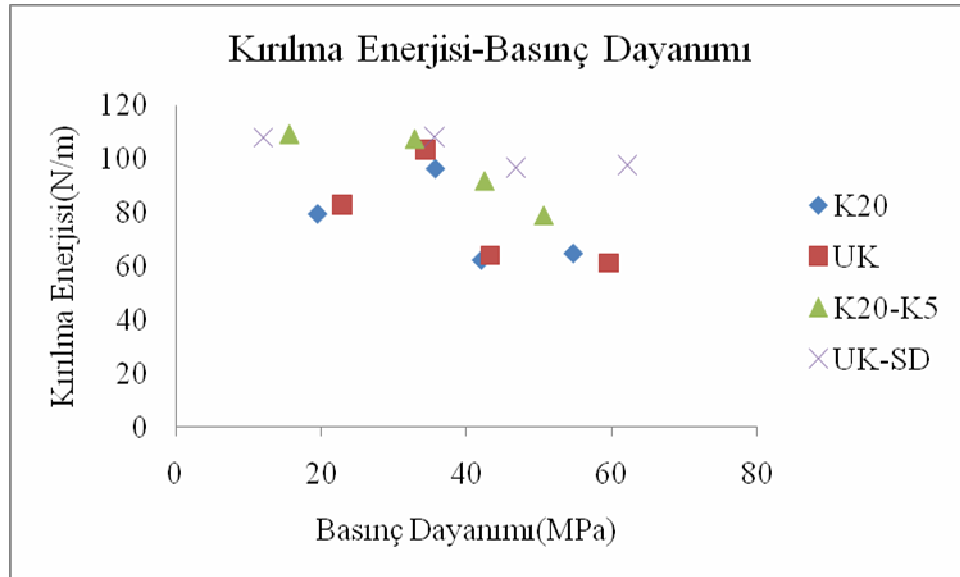
Çatlak günüyle kırılma enerjisi ilişkisini karşılaştırdığımızda deneyler arasında sistematik bir ilişki kurulamadığını görüyoruz. En erken çatlayan UK-SD numunesi

kırılma enerjisi sıralamasında ikinci en yüksek enerjiye sahipken, en son çatlayan K20 numunesi kırılma enerjisi sıralamasında üçüncü en yüksek enerjiye sahip olmuştur.

#### 4.8 Kırılma Enerjisi-Basınç Dayanımı

Kırılma enerjisi ile basınç dayanımını karşılaştırsak tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla kırılma enerjisi azalmıştır. Daha ince malzeme içeriğine sahip K20-K5 ve UK-SD numunelerinde düşüşün daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu betonlarda 1. günden 3. güne geçişte neredeyse hiç azalma görülmemiştir. 3. günden sonra K20-K5 numunesinde basınç dayanımındaki artışa rağmen kırılma enerjisinde düşüş görülmeye başlanmıştır. UK-SD numunesinde de düşüş olmasına rağmen K20-K5 kadar yüksek oranda değildir.

K20 ve UK numunelerinde 1. günden 3. güne dayanımla birlikte kırılma enerjisinde bir artış olmasına rağmen 3. günden 7. güne geçişte dayanım artışına rağmen kırılma enerjisinde azalma olmuştur. 7. günden 28. güne kırılma enerjisinde çok ufak değişiklikler olmuştur. Şekil 4.13'te kırılma enerjisi-basınç dayanımı karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

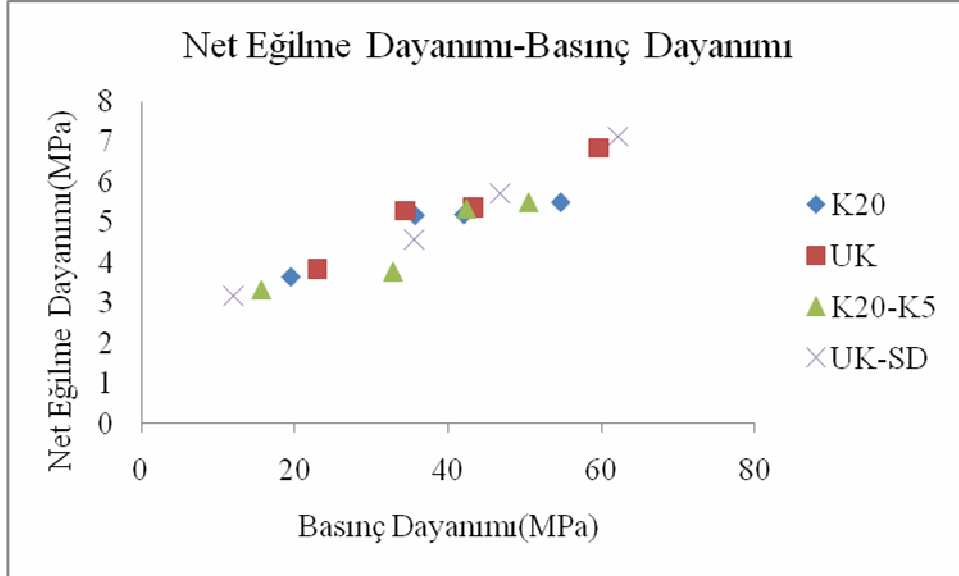


Şekil 4.13: Kırılma enerjisi-basınç dayanımı karşılaştırması.

#### 4.9 Net Eğilme Dayanımı-Basınç Dayanımı

Tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla net eğilme dayanımı da artmıştır. En düşük net eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranına kalsit içeren K20 ve K20-K5

numuneleri sahip olmuştur. Uçucu kül ve silis dumanının pozolanik etkisini burada açıkça görmekteyiz. K20-K5 ve UK-SD numuneleri bu oranda birbirlerine çok yakın değerler almışlardır. Şekil 4.14'te net eğilme dayanımı-basınç dayanımı karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

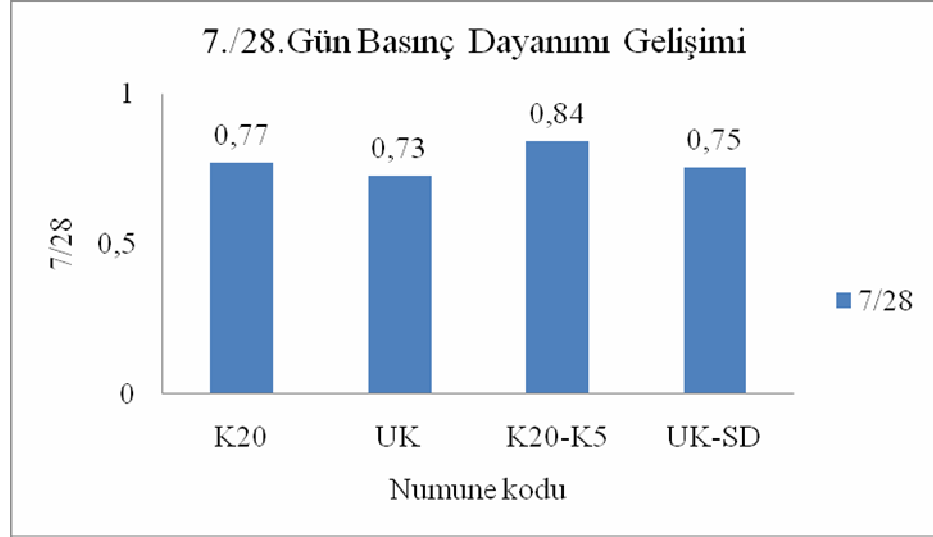


Şekil 4.14: Net eğilme dayanımı-basınç dayanımı karşılaştırması.

#### 4.10 7./28. Gün Basınç Dayanımı Gelişimi

Tüm numuneler 7. günde birbirine yakın basınç dayanımı değerlerine sahip olmasına rağmen 28. güne kadar olan dayanım gelişiminde kalsitin bir etkisinin olmadığını görüyoruz. Kalsitli betonlar erken yaş dayanımınlarında yüksek dayanımlar vermesine rağmen ilerleyen yaşlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlar aynı değerlere yaklaşmış ve 28. gün sonunda en yüksek dayanım değerine onlar sahip olmuştur.

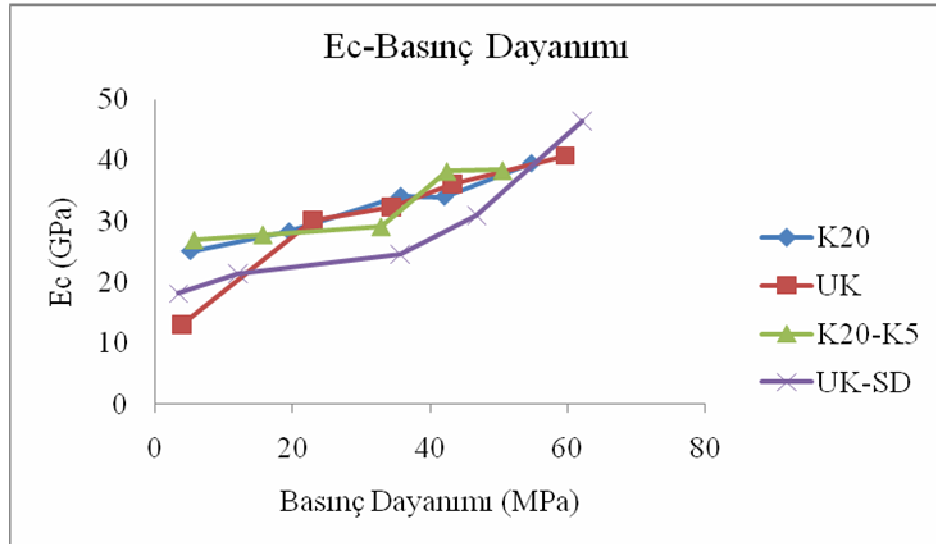
7. günden 28. güne en az dayanım gelişimi sırasıyla K20-K5, K1, UK-SD ve UK betonlarında görülmüştür. Şekil 4.15'te 7. gün/28. gün karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



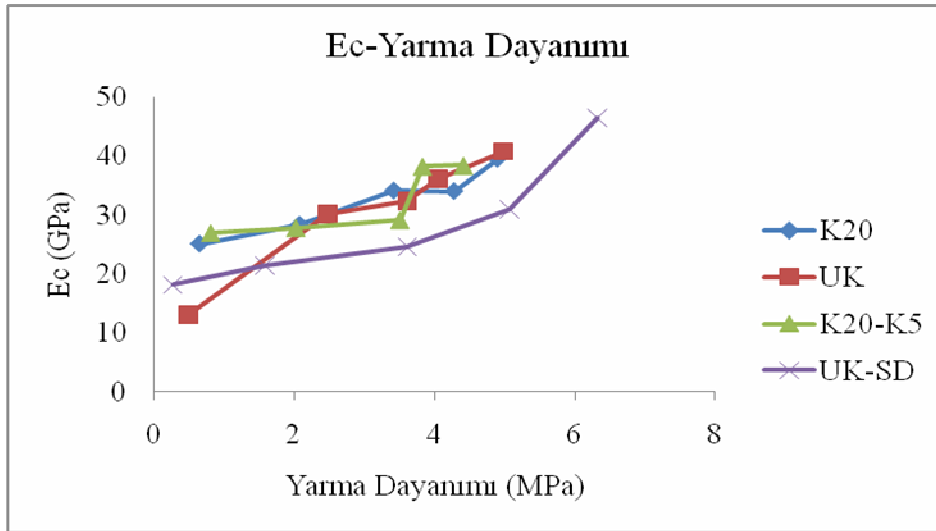
Şekil 4.15: 7./28. gün basınç dayanımı gelişimi karşılaştırması.

#### 4.11 Ec-Basınç Dayanımı ve Ec-Yarma Dayanımı Gelişimi

Tüm betolarda basınç dayanımının artışıyla elastisite modülünde de artış gözlemlenmiştir. UK-SD betonu 28. güne kadar en düşük elastisite modülü değerine sahipken 7. günden 28. güne geçişte çok hızlı bir dayanım artışıyla birlikte en yüksek elastisite modülü değerine sahip olmuştur. Şekil 4.16’da elastisite modülü-basınç dayanımı karşılaştırmalı grafiği, Şekil 4.17’de elastisite modülü-yarma dayanımı karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.



Şekil 4.16: Ec-Basınç dayanımı gelişimi karşılaştırması.



**Şekil 4.14:** Ec-Yarma dayanımı gelişimi karşılaştırması.

## 5. GENEL SONUÇLAR

- Erken yaşlarda kalsit içeren betonlar daha yüksek basınç dayanımına sahipken, ilerleyen yaşlarla birlikte uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlar daha yüksek dayanıma sahip olmuşlardır. Dayanımlar arasındaki gelişim farkı 7. ile 28. gün arasında daha belirgin hale gelmektedir.
- Silis dumanı içeren betonlar hariç diğer betonlarda 28. gün sonunda birbirine yakın elastisite modülü değerleri görülürken, silis dumanı içeren beton en yüksek elastisite modülü değerine sahip olmuştur.
- Kırılma enerjisinde 28 gün sonunda en yüksek değere silis dumanı ve uçucu külü birlikte içeren beton sahip olmuştur. Tüm numunelerde 3. günden sonra eğilme dayanımında artış ve kırılma enerjisinde azalma görülmüştür.
- Net eğilme dayanımında 28 gün sonunda en yüksek değere silis dumanı ve uçucu külü birlikte içeren beton sahip olmuştur. Kalsit içeren betonlar 7. günde 28. gündeki dayanımlarının ortalama %93'üne ulaşırken, bu oran uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlarda %80'de kalmıştır.
- En erken priz başlangıcı ve sonu değerine kalsit katkılı beton numuneleri sahip olmuştur. Betonları içerdikleri malzemenin inceliği açısından karşılaştıracak olursak, beton içinde malzeme inceliği arttıkça priz başlangıç ve bitiş süresi uzamıştır..
- Yanı adyabatik deneyler sonucunda uçucu kül ve kalsitin betonda benzer etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ancak silis dumanıyla karşılaştırdığımızda 14. güne kadar kalsitli betondaki yığışımli enerjinin daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Çökme kaybı ve yayılma kaybı beton içindeki malzemenin inceliğinin artmasıyla artmaktadır. Ayrıca katkı türüne de bağlıdır.
- Numuneleri halka testinde çatlak günü açısından inceleyecek olursak çatlak oluşumunda beton karışımında kullanılan malzemenin inceliğinin etkili

olduğu gözlemlenmiştir. Reaktif silis dumanı içeren karışım en erken çatlamıştır. Ayrıca kalsitin reaksiyona girmeyerek, uçucu kül ve silis dumanına göre daha fazla serbest su bulunmasına neden olduğu ve bunun sonucunda betonun plastik/kuruma rötne yapabilme kapasitesini arttırdığını da söyleyebiliriz.

- Tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla kırılma enerjisi azalmıştır. Yalnızca 20 mikron kalsit içeren ve uçucu kül içeren betonlarda 1. günden 3. güne geçişte basınç dayanımı artışıyla kırılma enerjisinde artış görülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanını birlikte içeren betonda kırılma enerjisindeki düşüş daha az olmuştur.
- Tüm numunelerde basınç dayanımının artmasıyla eğilme dayanımında artış görülmüştür.
- Tüm numuneler 7. günde birbirine yakın basınç dayanımı değerlerine sahip olmasına rağmen 28. güne kadar olan dayanım gelişiminde kalsitin bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Kalsitli betonlar erken yaş dayanımlarında yüksek dayanımlar vermesine rağmen ilerleyen yaşlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlar aynı değerlere yaklaşmış ve 28. gün sonunda en yüksek dayanım değerine uçucu kül ve silis dumanı içeren betonlar sahip olmuştur.
- Tüm betolarda basınç ve yarma dayanımının artışıyla elastisite modülünde de artış gözlemlenmiştir. Silis dumanı ve uçucu külü birlikte içeren beton 28. güne kadar en düşük elastisite modülü değerine sahipken 7. günden 28. güne geçişte çok hızlı bir dayanım artışıyla birlikte en yüksek elastisite modülü değerine sahip olmuştur.
- Sonuç olarak kalsit katkısının betonların erken yaş mekanik özelliklerine olumsuz bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Basınç ve yarma dayanımları açısından uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonlara kıyasla daha düşük değer almış olmalarına rağmen hesap dayanımını sağlamaları kalsitin mekanik özellikler bakımından beton içinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca kalsit ekonomik olarak da uçucu kül ve silis dumanına göre daha uygundur. Ancak kalsitin beton içinde kullanılabileceğini kesin olarak söyleyebilmek için kalsitin betonun durabilite özelliklerine etkisi de

incelenmelidir. Kalsitle uçucu külü tamamen yer değiştirmek yerine belirli oranlarda yer değiştirerek de deneyler yapılmalı, böylelikle beton içinde optimum kalsit kullanımı belirlenmelidir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Gani, M.S.J.**, 1997. Cement and Concrete, London.
- [2] **Ramachandran, V.S.**, 1984. Concrete Admixtures Handbook, New Jersey.
- [3] **ASTM C 618**, 1978. Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admbrture in Portland Cement Concrete.
- [4] **Özturan, T.**, 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerinin Etkinliği, 2. *Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, s.280-282.
- [5] **Hodson, V.**, 1990. Concrete Admixtures, New York.
- [6] **Akman, M.S.**, 1987. Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [7] **TS EN 450**, 1998. Uçucu Kül, Betonda Kullanılan Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [8] **Berry, E.E. and Malhotra, V.M.**, 1986. Fly Ash in Concrete, Ottawa.
- [9] **Tuygun, C. S.**, 2002, Çayırhan Uçucu Külünün Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Faktörünün İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [10] **ACI Committee**, 1987. Use of Fly Ash in Concrete, *ACI Materials Journal*, **84**, 381-409.
- [11] **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.
- [12] **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.
- [13] **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.

- [14] **Olek, J. and Diamond, S.**, 1989. Proportioning of Constant Paste Composition Fly Ash Concrete Mixes, *ACI Materials Journal*, **86**, pp.159-165.
- [15] **Schiebl, P., and Hardtl, 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.
- [16] **Neville, A. M.**, 1995. Properties of Concrete. Longman Group Limited, UK.
- [17] **Hassan, K. E., Cabrera, J. G., Bajracharya, Y. M.**, 1997. The Influence Of Fly Ash Content and Curing Temperature on the Properties of High Performance Concrete, *Proceedings of the Fifth International Conference*, Vol. 1. Bahrain, pp. 345-65.
- [18] **Erdoğan, T. Y.**, 2003. Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş. Ankara, 741s.
- [19] **Wooley, G. R., Cabrera, J. G.**, 1991. Early Age in-Situ Strength Development of Fly Ash Concrete in Thin Shells. Int. Conf. On Blended Cement, Sheffield.
- [20] **Yeğınobalı, A.**, 1995. Uçucu Kül ve Silis Dumanı Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Bazı Özellikleri, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, s. 213-225.
- [21] **Atış, 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.
- [22] **Langley, W.S., Carrette, 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.
- [23] **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 I*, Trondheim, Norway, pp. 331-347.

- [24] **Poon, C. S., Lam, WONG, Y. L.,** 2000. A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. **30**, pp. 447-455.
- [25] **Giaccio, G., Violini, D., Zappitelli and Zerbino, R.,** 1989. Compressive Strength and Elastic Properties of Fly Ash Concrete Elaborated with Different Cement Types, *Supplementay Papers of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag andPozzolans in Concrete*, Trondheim, Norway, pp. 188-202.
- [26] **Mehta, P.K. and Gjorv, O.E.,** 1982. Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume, *Cement and Concrete Research*, **12**, pp.587-595.
- [27] **Haque, M.N., Langan B.W. and Ward M.A.,** 1984. High Fly Ash Concretes, *ACIJournal*, **81**, pp.54-60.
- [28] **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.
- [29] **Hassan, K. E., Cabrera, J. G., Maliche, R. S.,** 2000. The Effect of Mineral Admixtures on the Properties of High-Performance Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. **22**, pp. 267-271.
- [30] **Özturan, T.,** 1993. Uluslararası LV. CANMET-ACI Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, s.57-78.
- [31] **Koca, C.,** 1996. Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.381-394.
- [32] **Malhotra, V.M.,** 1997. Mineral Admixtures. *Concrete Construction Engineering Handbook*, Nawy Edward G. CRC Press, New York, pp.27-36.
- [33] **Yeğinoğlu, A.,** 1993. Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri*, Ankara, s.149-167.
- [34] **Yazıcı, Ş.,** 1996. The Mechanical Properties and Durability of High Strength Concrete with Silica Fume and Fly Ash, *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 115s.

- [35] **Akçaözoğlu, K.**, 2007. Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [36] **Duval, R., Kadri, E.H.**, 1998. Influence of Silica Fume on The Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes, *Cement and Concrete Research*, v. **28**, n.4, pp.533-547.
- [37] **Jahren, P.**, 1993. Use of Silica Fume in Concrete, ACI Sp Publication SP-79, Detroit, s.625-645.
- [38] **Ekinci, C.E., Yeğınobalı, M.A.**, 1996. Silis Dumanı Katkılı Betonların Çarpma Dayanımı, 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.279-289.
- [39] **Aitcin, P.C., Laplante, P.**, 1990. Long-Term Compressive Strength of Silica Fume Concrete. *J. Materials in Civil Engineering*, 3 (3), pp.164-170.
- [40] **Khayat, K.H., Vachon, M., Lanctot, M.-C.**, 1997. Use of Blendend Silica Fume Cement in Commercial Concrete Mixtures, *ACI Material Journal*, v.**94**, n.3, pp.183- 192.
- [41] **Çark, A., Sümer, M.**, 1996. Değişik Kür Şartlarında Silis Dumanı Kullanımının Betonun Mukavemetine Etkisi, Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar, 4. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, s.267-277.
- [42] **Khayat, K.H., Aitcin, P.C.**, 1992. Silica Fume in Concrete: an Overview, ACI Sp Publication S132, Detroit, pp.835-872.
- [43] **Çelik, H.M., Şimşek, O., Sancak, E.** 2001. Silis Dumanı Kullanımının Çimentonun Priz Başlama ve Bitiş Sürelerine Etkisi, *Politeknik Dergisi*, 4(4), s.55-60.
- [44] **Larbi, J.A., Fraay,A.L.A., Bijen, J.M.**, 1990. The Chemistry of The Porefluid of Silica Fume-Blended Cement Systems, *Cement and Concrete Research*, **20** (4), pp.506-516.
- [45] **Holand, I. , Carette, G.G. and Malhotra, V.M. ,** 1989 *Proceedings of Third CANMET/ACI International Conference on Fly Ash , Silica Fume , Slag and Natural Pozzolans in Concrete* , Trondheim , Norway.
- [46] **Bentur, A., Bonen, D., Goldman, A.**, 1993. Discussion of a Paper by Chong,X.. at all. Roll of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar and Concrete. *ACI Material Journal*, pp.376.

- [47] **Taşdemir, C.**, 1996. Mikrofiller Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.199-208.
- [48] **Taşdemir, C., Akyüz, S., Taşdemir, M.A., Koca, C.**, 1994. Silis Dumanı İçeren Yüksek Mukavemetli Betonların Basınç Altındaki Davranışı. 3.Ulusal Beton Kongresi Hazır Beton Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.175-187.
- [49] **Xiaofeng, C.**, 1993. Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar and Concrete. *ACI Materials Journal*, Detroit, **89** (4), pp.375-388.
- [50] **Jahren, P.**, 1993. Use of Silica Fume in Concrete. ACI Sp Publication SP-79, Detroit, s.625-645.
- [51] **Malhotra, V.M., Ramachandran, V.S., Feldman, R.F., Aitcin P.C.**, 1987. Condensed Silica Fume in Concrete. CRC Pres Inc., Florida.
- [52] **Carette, G.G., Malhotra, V.M, Aitcin P.C.**, 1987. Preliminary Data on Long-Term Strength Development of Condensed Silica Fume Concrete. Canmet Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal.
- [53] **Yogendran, V. Langan, B.W., Haque, M.N., Ward, M.A.**, 1987. Silica Fume in High Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, Detroit, **84** (2), pp.124-129.
- [54] **Bhanja, S., Sengupta, B.** 2005. Influence of Silica Fume on The Tensile Strength of Concrete. *Cement and Concrete Research*, v.35, pp.743-747.
- [55] **Yeğınobalı, A.**, 2001. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Ankara.
- [56] **Malhotra, V.M. , Carette, G.G.**, 1991 Silica Fume in Concrete, *CANMET/ACI International Workshop on Silica fume in concrete*, Washington, D.C., U.S.A.
- [57] **Shannag, M.J.**, 2000. High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume, *Cement and Concrete Composites*, 22, 399-406.
- [58] **Devlet Planlama Teşkilatı Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı**, 2001. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Genel Endüstri Mineralleri I Çalışma Grubu Raporu, Ankara

- [59] **Yahia, A., Tanimura, M., Shimoyama, Y.,** 2005. Rheological Properties of Highly Flowable Mortar Containing Limestone Filler-Effect of Powder Content and W/C Ratio, *Cement and Concrete Research*, **35**, pp 532-539.
- [60] **Ozawa, K., Sakata, N., Okamura, H.,** 1995. Evaluation of Self-Compactability of Fresh Concrete Using the Funnel Test, *Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.* **25**, (June) 59– 75.
- [61] **Fujiwara, H., Nagataki, S., Otsuki, N., Endo, H.,** 1996. Study on Reducing Unit Powder Content on High-Fluidity Concrete by Controlling Powder Particle Size Distribution, *Transl. Proc. Jpn. Soc. Civ. Eng.* **30** (532) pp 117– 127.
- [62] **Daimon, M., Sakai, E.,** 1998. Limestone Powder Concerning Reaction and Rheology, *4<sup>th</sup> CANMET/ACI/JCI Int. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology*, Shigeyoshi Nagataki Symposium, Tokushima, Japan, pp. 41– 54.
- [63] **Yahia, A., Tanimura, M., Shimabukuro, A., Shimoyama, H., Tochigi, T.,** 1999. Effect of Mineral Admixtures on Rheological Properties of Equivalent Self-Compacting Concrete Mortar, *Proceedings of the 7th East Asia-Pacific Conf. on Structural Engineering & Construction*, Kochi, Japan, August 27– 29, pp. 1330– 1335.
- [64] **Nehdi, M., Mindess, S.,** 1998. Rheology of High-Performance Concrete: Effect of Ultrafine Particles, *Cement and Concrete Research*, **28**, pp 687– 697.
- [65] **Bonavetti, V., Donza, H., Mene'ndez, G., Cabrera, O., Irassar, E.F.,** 2003. Limestone Filler Cement in Low W/C Concrete: A Rational Use of Energy , *Cement and Concrete Research*, **33**, pp 865–871.
- [66] **Moir, G., Kelham, S.,** 1997. Developments in Manufacture and Use of Portland Limestone Cement, in: V.M. Malhotra (Ed.), *Proceedings of High-Performance Concrete*, ACI SP-172, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp. 797– 819.
- [67] **Bonavetti, V.L., Donza, H., Rahhal, V.F., Irassar, E.F.,** 1999. High Strength Concrete With Limestone Filler Cements, in: V.M. Malhotra, P. Helene, D.C.C. Dal Molin. (Eds.), *High-Performance Concrete and Performance and Quality of Concrete Structures*, ACI SP- 186, American Concrete Institute, Farmington Hill, MI, pp. 567– 580.

- [68] **Opoczky, L.**, 1992. Progress of the Particle Size Distribution During the Intergrinding of a Clinker– Limestone mixture, *Zem.–Kalk– Gips* 45 (12) 648–651.
- [69] **Ünal, O., Kibici, Y.**, 2001. Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımının Araştırılması, Türkiye III. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı.
- [70] **Petersson, Ö.**, 2002. Limestone Powder as Filler in Self-Compacting Concrete – Frost Resistance, Compressive Strength and Chloride Diffusivity, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, p. 391-396.
- [71] **Benachour, Y., Davy, C.A., Skoczylas, F., Houari, H.**, 2008. Effect of a High Calcite Filler Addition Upon Microstructural, Mechanical, Shrinkage and Transport Properties of a Mortar, *Cement and Concrete Research*, **38**, pp 727–736.
- [72] **Feldman, R.F., Ramachandran, V.S., Sereda, P.J.**, 1965. Influence of  $\text{CaCO}_3$  on the Hydration of  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$ , *J. Am. Ceram. Soc.* 48 (1) pp 25–30.
- [73] **Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, E.**, 2005. Mineral Admixtures in Mortars: Effect of Type, Amount and Fineness of Fine Constituents on Compressive Strength, *Cement and Concrete Research*, **35**, pp 1092–1105.
- [74] **Moosberg-Bustnes, H., Lagerblad, B., Forssberg, E.**, 2004. The Function of Fillers in Concrete, *Materials Structure*, **37**, pp 74–81.
- [75] **Topçu, I.B., Ugurlu, A.**, 2003. Effect of the Use of Mineral Fillers in the Properties of Concrete, *Cement and Concrete Research*, **33**, pp 1071–1075.
- [76] **Esping, O.**, 2008. Effect of Limestone Filler  $\text{BET}(\text{H}_2\text{O})$ -Area on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, **38**, pp 938–944.
- [77] **Bonavetti, V.L., Rahhal, V.F., Irassar, E.F.**, 2001. Studies on the Carboaluminate Formation in Limestone Filler-Blended Cements, *Cement and Concrete Research*, **31**, pp 853–859.
- [78] **Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., Uyulgan, B.**, 2006. The Effect of Fly Ash and Limestone Fillers on the Viscosity and

Compressive Strength of Self-Compacting Repair Mortars, *Cement and Concrete Research*, **36**, pp 1719–1726

- [79] **Zhu, W., Gibbs, J.C.**, 2005. Use of Different Limestone and Chalk Powders in Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, **35**, pp 1457– 1462.
- [80] **Çankayalı, A., Gökçe, M., Levent, K. Y.**, 2009. Taze Beton Bünyesindeki İnce Malzeme Hamuru Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yapılarda Kimyasal Katkılar 3. Sempozyumu Bildiriler Kitabı, syf 25-42.
- [81] **Gökçe, M., Dalmış, K., Şimşek, O.**, 2009. Farklı Tip Akışkanlaştırıcı Katkı ile Değişik Oranlarda Mermer Tozu İkame Edilen Betonların Performansları, Yapılarda Kimyasal Katkılar 3. Sempozyumu Bildiriler Kitabı, syf 215-224.
- [82] **RILEM 50-FMC, 1985.** Committee of fracture mechanics of concrete, Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend tests on notched beams, *Materials and Structures*, **18**, **106**, 285-290.
- [83] **BS EN 13294, 2002.** Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures-Test methods-Determination of Stiffening Time.
- [84] **NT BUILD 388**, 1992. Nordtest Method, Nordtest, Finland.
- [85] **ASTM C-1581**, 2004. Standard Test Method for Determining Age at Cracking And Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar And Concrete Under Restrained Shrinkage, ASTM, U.S.A.
- [86] **TS EN 12350**, 2002. Taze Beton Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [87] **TS EN 12390**, 2002. Sertleşmiş Beton Deneyleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [88] **NT BUILD 205**, 1984. Nordtest Method, Nordtest, Finland.

## EKLER

**Çizelge A.1:** Agregaların tane boyutu dağılımı.

| Elek<br>Göz<br>Açıklığı<br>(mm) | Elekten Geçen (%) |            |          |              |         |
|---------------------------------|-------------------|------------|----------|--------------|---------|
|                                 | Kırmataş II       | Kırmataş I | Kırmakum | Doğal<br>Kum | Karışım |
| 22                              | 100               | 100        | 100      | 100          | 100     |
| 16                              | 66                | 100        | 100      | 100          | 91      |
| 8                               | 2                 | 63         | 100      | 100          | 70      |
| 4                               | 1                 | 5          | 85       | 100          | 53      |
| 2                               | 1                 | 2          | 55       | 96           | 39      |
| 1                               | 1                 | 2          | 30       | 79           | 27      |
| 0,5                             | 1                 | 1          | 16       | 52           | 18      |
| 0,25                            | 1                 | 1          | 6        | 23           | 7       |
| 0,125                           | 1                 | 1          | 3        | 4            | 2       |
| 0,063                           | 0,8               | 0,7        | 2,5      | 2,1          | 2       |
|                                 |                   |            |          |              |         |
| Karışım                         | 27%               | 26%        | 27%      | 20%          | 100%    |

**Çizelge A.2:** K20 betonu basınç dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |              |
|----------|---------|---------------|----------|--------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort. Dayanım |
| 1        | 89,5    | 5,1           | 88,6     | 5,0          |
| 2        | 87,7    | 5,0           |          |              |
| 1. gün   |         |               |          |              |
| 3        | 337,7   | 19,1          | 343,3    | 19,4         |
| 4        | 348,9   | 19,7          |          |              |
| 3. gün   |         |               |          |              |
| 5        | 625,5   | 35,4          | 630,7    | 35,7         |
| 6        | 633,0   | 35,8          |          |              |
| 7        | 633,6   | 35,9          |          |              |
| 7. gün   |         |               |          |              |
| 8        | 656,1   | 37,1          | 743,1    | 42,1         |
| 9        | 745,0   | 42,2          |          |              |
| 10       | 741,3   | 42,0          |          |              |
| 28. gün  |         |               |          |              |
| 11       | 930,1   | 52,6          | 967,2    | 54,7         |
| 12       | 998,4   | 56,5          |          |              |
| 13       | 973,2   | 55,1          |          |              |

**Çizelge A.3:** K20 betonu yarma dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün  |         |               |          |                 |
|-----------|---------|---------------|----------|-----------------|
| Num<br>no | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort.<br>Dayanım |
| 1         | 48,3    | 0,7           | 45,4     | 0,6             |
| 2         | 41,5    | 0,6           |          |                 |
| 3         | 46,4    | 0,7           |          |                 |
| 1. gün    |         |               |          |                 |
| 4         | 153,8   | 2,2           | 152,6    | 2,1             |
| 5         | 134,0   | 1,9           |          |                 |
| 6         | 170,1   | 2,1           |          |                 |
| 3. gün    |         |               |          |                 |
| 7         | 242,5   | 3,4           | 241,8    | 3,4             |
| 8         | 239,7   | 3,4           |          |                 |
| 9         | 243,2   | 3,4           |          |                 |
| 7. gün    |         |               |          |                 |
| 10        | 317,2   | 4,5           | 291,4    | 4,3             |
| 11        | 288,0   | 4,1           |          |                 |
| 12        | 269,1   | 3,8           |          |                 |
| 28. gün   |         |               |          |                 |
| 13        | 323,1   | 4,6           | 346,0    | 4,9             |
| 14        | 391,0   | 5,5           |          |                 |
| 15        | 323,8   | 4,6           |          |                 |

**Çizelge A.4:** K20 betonu elastisite modülü değerleri.

| 0,5. Gün |      |      |        |        |
|----------|------|------|--------|--------|
| Num no   | Eo   | Ec   | Ort Eo | Ort Ec |
| 1        | 11,6 | 24,0 | 13,3   | 25,0   |
| 2        | 14,0 | 24,4 |        |        |
| 3        | 14,2 | 26,7 |        |        |
| 1. gün   |      |      |        |        |
| 4        | 10,9 | 15,9 | 22,0   | 28,3   |
| 5        | 18,8 | 21,0 |        |        |
| 6        | 25,1 | 35,6 |        |        |
| 3. gün   |      |      |        |        |
| 7        | 31,3 | 32,6 | 30,8   | 34,1   |
| 8        | 33,3 | 35,6 |        |        |
| 9        | 28,0 | 33,9 |        |        |
| 7. gün   |      |      |        |        |
| 10       | 29,3 | 34,5 | 30,7   | 34,0   |
| 11       | 31,9 | 33,7 |        |        |
| 12       | 30,9 | 33,7 |        |        |
| 28. gün  |      |      |        |        |
| 13       | 41,9 | 43,1 | 39,0   | 39,5   |
| 14       | 37,4 | 38,0 |        |        |
| 15       | 37,6 | 37,4 |        |        |

**Çizelge A.5:** UK betonu basınç dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |             |
|----------|---------|---------------|----------|-------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort Dayanım |
| 1        | 68,1    | 3,9           | 68,1     | 3,9         |
| 2        | 68,4    | 3,9           |          |             |
| 3        | 67,7    | 3,8           |          |             |
| 1. gün   |         |               |          |             |
| 4        | 393,1   | 22,4          | 403,9    | 22,9        |
| 5        | 407,2   | 23,1          |          |             |
| 6        | 411,2   | 23,3          |          |             |
| 3. gün   |         |               |          |             |
| 7        | 609,8   | 34,5          | 607,5    | 34,4        |
| 8        | 599,5   | 33,9          |          |             |
| 9        | 613,2   | 34,7          |          |             |
| 7. gün   |         |               |          |             |
| 10       | 743,0   | 42,1          | 764,9    | 43,3        |
| 11       | 781,0   | 44,2          |          |             |
| 12       | 770,6   | 43,6          |          |             |
| 28. gün  |         |               |          |             |
| 13       | 1093,2  | 61,9          | 1053,7   | 59,6        |
| 14       | 1061,9  | 60,1          |          |             |
| 15       | 1005,9  | 56,9          |          |             |

**Çizelge A.6:** UK betonu yarma dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün  |         |               |          |                 |
|-----------|---------|---------------|----------|-----------------|
| Num<br>no | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort.<br>Dayanım |
| 1         | 34,6    | 0,5           | 34,5     | 0,5             |
| 2         | 34,4    | 0,5           |          |                 |
| 3         | 34,5    | 0,5           |          |                 |
| 1. gün    |         |               |          |                 |
| 4         | 167,7   | 2,4           | 174,4    | 2,5             |
| 5         | 171,7   | 2,4           |          |                 |
| 6         | 183,8   | 2,6           |          |                 |
| 3. gün    |         |               |          |                 |
| 7         | 278,3   | 3,9           | 255,1    | 3,6             |
| 8         | 233,0   | 3,3           |          |                 |
| 9         | 254,1   | 3,6           |          |                 |
| 7. gün    |         |               |          |                 |
| 10        | 273,1   | 3,9           | 286,2    | 4,0             |
| 11        | 304,0   | 4,3           |          |                 |
| 12        | 281,5   | 4,0           |          |                 |
| 28. gün   |         |               |          |                 |
| 13        | 336,5   | 4,8           | 352,1    | 5,0             |
| 14        | 385,0   | 5,5           |          |                 |
| 15        | 334,7   | 4,7           |          |                 |

**Çizelge A.7:** UK betonu elastisite modülü değerleri.

| 0,5. Gün |      |      |        |        |
|----------|------|------|--------|--------|
| Num no   | Eo   | Ec   | Ort Eo | Ort Ec |
| 1        | 10,0 | 11,5 | 10,5   | 13,1   |
| 2        | 10,2 | 12,5 |        |        |
| 3        | 10,9 | 13,6 |        |        |
| 1. gün   |      |      |        |        |
| 4        | 26,9 | 28,7 | 27,2   | 30,1   |
| 5        | 27,2 | 29,5 |        |        |
| 6        | 27,1 | 30,6 |        |        |
| 3. gün   |      |      |        |        |
| 7        | 30,7 | 31,1 | 31,2   | 32,3   |
| 8        | 31,7 | 32,0 |        |        |
| 9        | 31,2 | 33,7 |        |        |
| 7. gün   |      |      |        |        |
| 10       | 34,6 | 36,6 | 33,9   | 36,1   |
| 11       | 31,9 | 33,0 |        |        |
| 12       | 35,1 | 38,7 |        |        |
| 28. gün  |      |      |        |        |
| 13       | 38,8 | 40,6 | 39,2   | 40,7   |
| 14       | 38,4 | 41,1 |        |        |
| 15       | 40,2 | 40,5 |        |        |

**Çizelge A.8:** K20-K5 betonu basınç dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |              |
|----------|---------|---------------|----------|--------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort. Dayanım |
| 1        | 99,7    | 5,7           | 99,5     | 5,7          |
| 2        | 99,2    | 5,7           |          |              |
| 1. gün   |         |               |          |              |
| 3        | 276,1   | 15,6          | 276,9    | 15,7         |
| 4        | 277,7   | 15,7          |          |              |
| 3. gün   |         |               |          |              |
| 5        | 553,5   | 31,3          | 580,7    | 32,9         |
| 6        | 607,9   | 34,4          |          |              |
| 7. gün   |         |               |          |              |
| 7        | 739,1   | 41,8          | 750,1    | 42,4         |
| 8        | 709,2   | 40,1          |          |              |
| 9        | 802,0   | 45,4          |          |              |
| 28. gün  |         |               |          |              |
| 10       | 930,4   | 52,7          | 893,5    | 50,6         |
| 11       | 834,2   | 47,2          |          |              |
| 12       | 915,7   | 51,8          |          |              |

**Çizelge A.9:** K20-K5 betonu yarma dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |              |
|----------|---------|---------------|----------|--------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort. Dayanım |
| 1        | 55,6    | 0,8           | 57,0     | 0,8          |
| 2        | 58,5    | 0,8           |          |              |
| 3        | 56,8    | 0,8           |          |              |
| 1. gün   |         |               |          |              |
| 4        | 141,7   | 2,0           | 143,0    | 2,0          |
| 5        | 142,9   | 2,0           |          |              |
| 6        | 144,4   | 2,0           |          |              |
| 3. gün   |         |               |          |              |
| 7        | 261,0   | 3,7           | 247,8    | 3,5          |
| 8        | 240,5   | 3,4           |          |              |
| 9        | 241,9   | 3,4           |          |              |
| 7. gün   |         |               |          |              |
| 10       | 263,5   | 3,7           | 270,4    | 3,8          |
| 11       | 293,1   | 4,2           |          |              |
| 12       | 254,4   | 3,6           |          |              |
| 28. gün  |         |               |          |              |
| 13       | 267,2   | 3,8           | 318,9    | 4,4          |
| 14       | 314,9   | 4,5           |          |              |
| 15       | 374,6   | 5,0           |          |              |

**Çizelge A.10:** K20-K5 betonu elastisite modülü değerleri.

| 0,5. gün |      |      |        |        |
|----------|------|------|--------|--------|
| Num no   | Eo   | Ec   | Ort Eo | Ort Ec |
| 1        | 13,5 | 27,1 | 17,5   | 27,0   |
| 2        | 18,2 | 28,4 |        |        |
| 3        | 20,8 | 25,5 |        |        |
| 1. gün   |      |      |        |        |
| 4        | 22,0 | 26,5 | 21,2   | 25,8   |
| 5        | 19,9 | 26,8 |        |        |
| 6        | 21,6 | 24,3 |        |        |
| 3. gün   |      |      |        |        |
| 7        | 24,3 | 29,0 | 24,9   | 29,1   |
| 8        | 28,5 | 33,0 |        |        |
| 9        | 21,9 | 25,4 |        |        |
| 7. gün   |      |      |        |        |
| 10       | 36,0 | 37,3 | 36,4   | 38,3   |
| 11       | 36,9 | 39,3 |        |        |
| 28. gün  |      |      |        |        |
| 12       | 37,6 | 38,4 | 37,8   | 38,4   |
| 13       | 38,0 | 38,4 |        |        |

**Çizelge A.11:** UK-SD betonu basınç dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |              |
|----------|---------|---------------|----------|--------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort. Dayanım |
| 1        | 61,6    | 3,5           | 60,2     | 3,4          |
| 2        | 59,7    | 3,4           |          |              |
| 3        | 59,3    | 3,4           |          |              |
| 1. gün   |         |               |          |              |
| 4        | 205,6   | 11,6          | 212,2    | 12,0         |
| 5        | 215,9   | 12,2          |          |              |
| 6        | 215,1   | 12,2          |          |              |
| 3. gün   |         |               |          |              |
| 7        | 627,3   | 35,5          | 628,4    | 35,6         |
| 8        | 638,5   | 36,2          |          |              |
| 9        | 619,3   | 35,1          |          |              |
| 7. gün   |         |               |          |              |
| 10       | 820,1   | 46,4          | 826,0    | 46,8         |
| 11       | 824,1   | 46,7          |          |              |
| 12       | 833,9   | 47,2          |          |              |
| 28. gün  |         |               |          |              |
| 13       | 1142,6  | 64,7          | 1097,4   | 62,1         |
| 14       | 1116,7  | 63,2          |          |              |
| 15       | 1032,8  | 58,5          |          |              |

**Çizelge A.12:** UK-SD betonu yarma dayanımı değerleri.

| 0,5. Gün |         |               |          |              |
|----------|---------|---------------|----------|--------------|
| Num no   | Yük(kN) | Dayanım (MPa) | Ort. Yük | Ort. Dayanım |
| 1        | 18,5    | 0,3           | 18,9     | 0,3          |
| 2        | 19,3    | 0,3           |          |              |
| 3        | 19,0    | 0,3           |          |              |
| 1. gün   |         |               |          |              |
| 4        | 112,9   | 1,6           | 111,2    | 1,6          |
| 5        | 109,2   | 1,6           |          |              |
| 6        | 111,6   | 1,6           |          |              |
| 3. gün   |         |               |          |              |
| 7        | 245,4   | 3,5           | 255,0    | 3,6          |
| 8        | 270,7   | 3,8           |          |              |
| 9        | 248,8   | 3,5           |          |              |
| 7. gün   |         |               |          |              |
| 10       | 345,5   | 4,9           | 358,5    | 5,1          |
| 11       | 359,1   | 5,1           |          |              |
| 12       | 370,9   | 5,2           |          |              |
| 28. gün  |         |               |          |              |
| 13       | 451,8   | 6,4           | 446,7    | 6,3          |
| 14       | 427,5   | 6,0           |          |              |
| 15       | 460,9   | 6,5           |          |              |

**Çizelge A.13:** UK-SD betonu elastisite modülü değerleri.

| 0,5. Gün |      |      |        |        |
|----------|------|------|--------|--------|
| Num no   | Eo   | Ec   | Ort Eo | Ort Ec |
| 1        | 1,5  | 14,7 | 3,3    | 18,1   |
| 2        | 5,6  | 20,7 |        |        |
| 3        | 2,8  | 19,1 |        |        |
| 1. gün   |      |      |        |        |
| 4        | 13,7 | 22,6 | 11,5   | 21,4   |
| 5        | 10,4 | 20,6 |        |        |
| 6        | 10,4 | 20,9 |        |        |
| 3. gün   |      |      |        |        |
| 7        | 22,7 | 25,8 | 22,2   | 24,6   |
| 8        | 21,5 | 24,4 |        |        |
| 9        | 22,4 | 23,6 |        |        |
| 7. gün   |      |      |        |        |
| 10       | 24,0 | 28,2 | 28,4   | 30,9   |
| 11       | 35,7 | 37,7 |        |        |
| 12       | 25,5 | 27,0 |        |        |
| 28. gün  |      |      |        |        |
| 13       | 43,0 | 45,6 | 43,2   | 46,5   |
| 14       | 42,5 | 46,3 |        |        |
| 15       | 44,1 | 47,4 |        |        |

**Çizelge A.14:** Kırılma enerjisi değerleri.

|     | Kırılma Enerjisi (N/m) |     |        |       |
|-----|------------------------|-----|--------|-------|
| Gün | K20                    | UK  | K20-K5 | UK-SD |
| 1   | 79                     | 83  | 109    | 108   |
| 3   | 96                     | 103 | 107    | 108   |
| 7   | 62                     | 64  | 92     | 97    |
| 28  | 65                     | 61  | 79     | 98    |

**Çizelge A.15:** Net eğilme dayanımı değerleri.

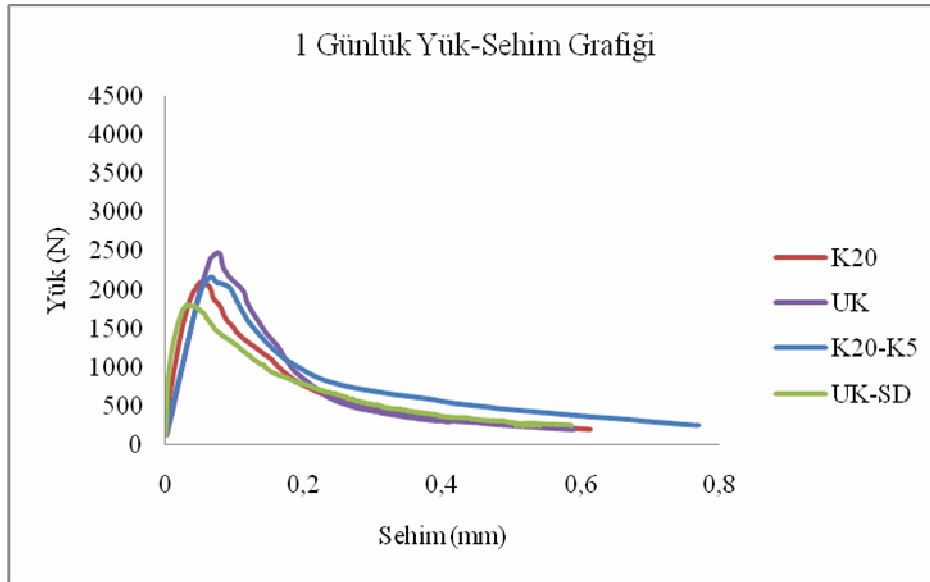
|     | Net Eğilme Dayanımı (MPa) |     |        |       |
|-----|---------------------------|-----|--------|-------|
| Gün | K20                       | UK  | K20-K5 | UK-SD |
| 1   | 3,7                       | 3,8 | 3,3    | 3,2   |
| 3   | 5,2                       | 5,3 | 3,8    | 4,6   |
| 7   | 5,2                       | 5,4 | 5,3    | 5,7   |
| 28  | 5,5                       | 6,8 | 5,5    | 7,1   |

**Çizelge A.16:** Halka testi değerleri.

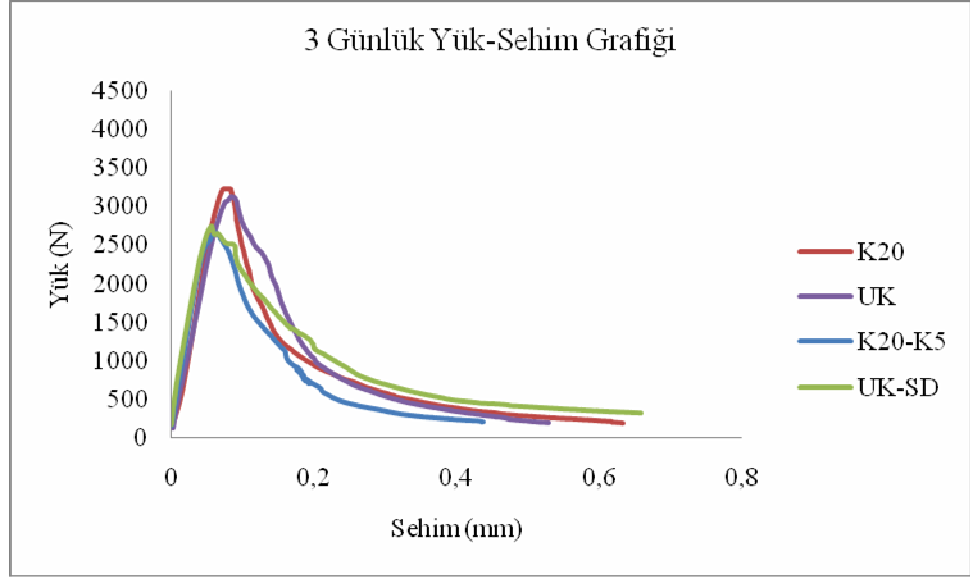
|                        | K20 | UK  | K20-K5 | UK-SD |
|------------------------|-----|-----|--------|-------|
| Çatlak Günü            | 47  | 19  | 13     | 9     |
| Kırılma Enerjisi (N/m) | 86  | 67  | 112    | 104   |
| Net Eğilme Day. (MPa)  | 4,0 | 4,0 | 5,4    | 6,5   |

**Çizelge A.17:** Priz başlangıç ve bitiş süreleri.

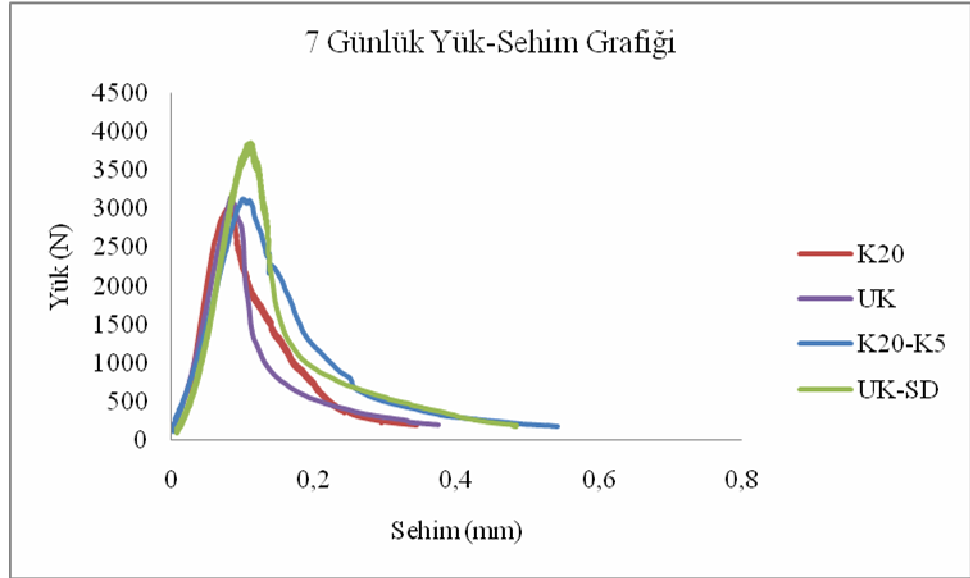
|        | Priz Başlangıcı(dk) | Priz Sonu(dk) |
|--------|---------------------|---------------|
| K20    | 165                 | 240           |
| UK     | 210                 | 300           |
| K20-K5 | 195                 | 270           |
| UK-SD  | 360                 | 600           |



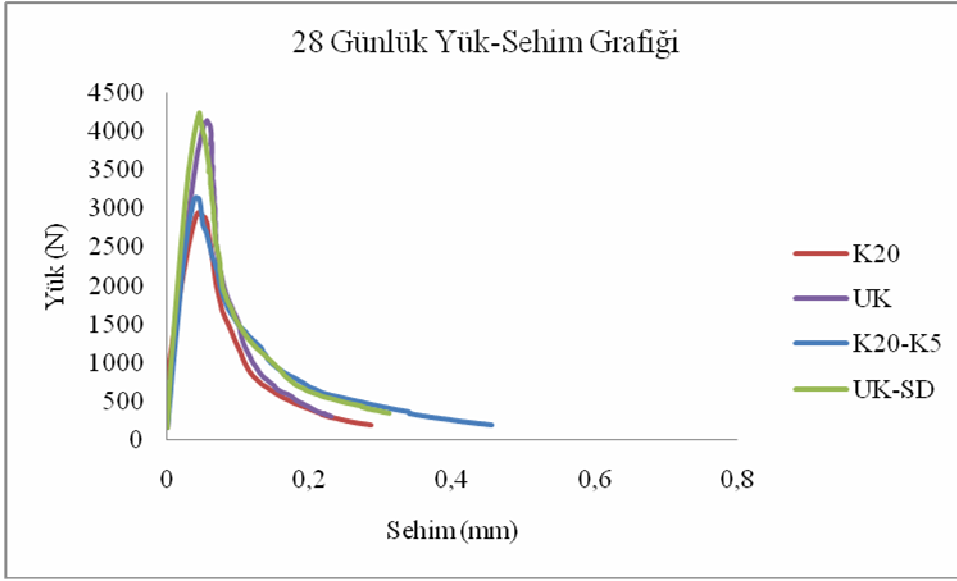
**Şekil A.1:** Tüm numunelerin 1 günlük yük-sehim grafiği.



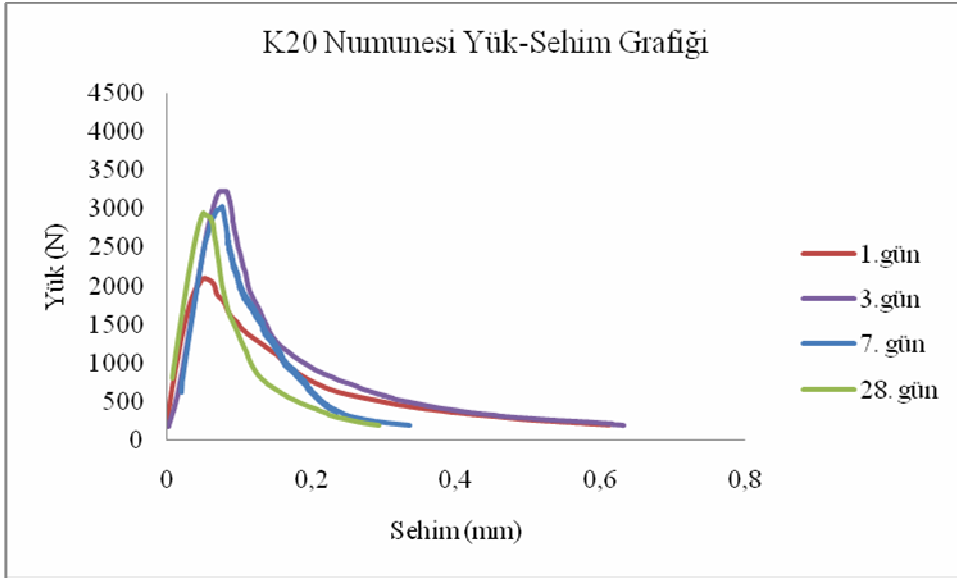
**Şekil A.2:** Tüm numunelerin 3 günlük yük-sehim grafiği.



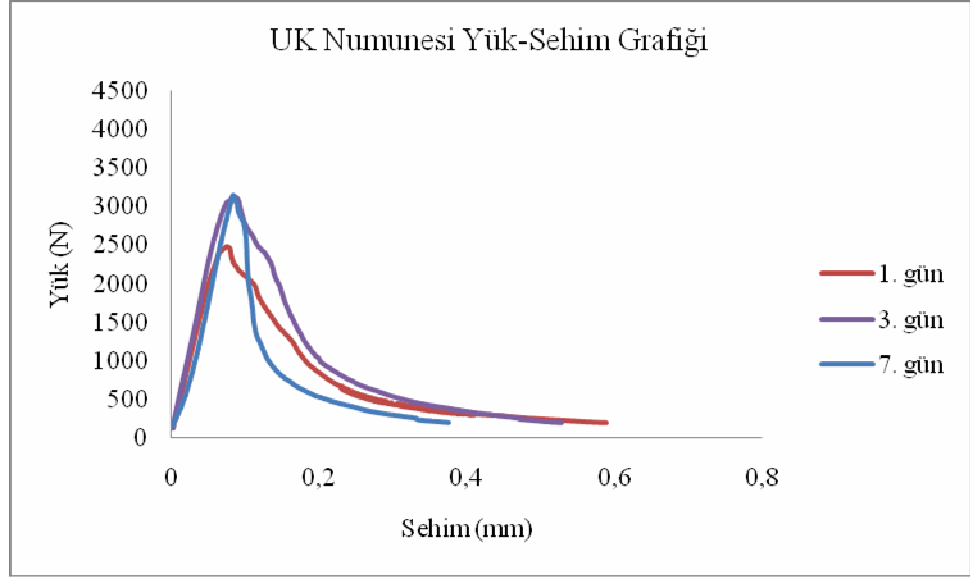
**Şekil A.3:** Tüm numunelerin 7 günlük yük-sehim grafiği.



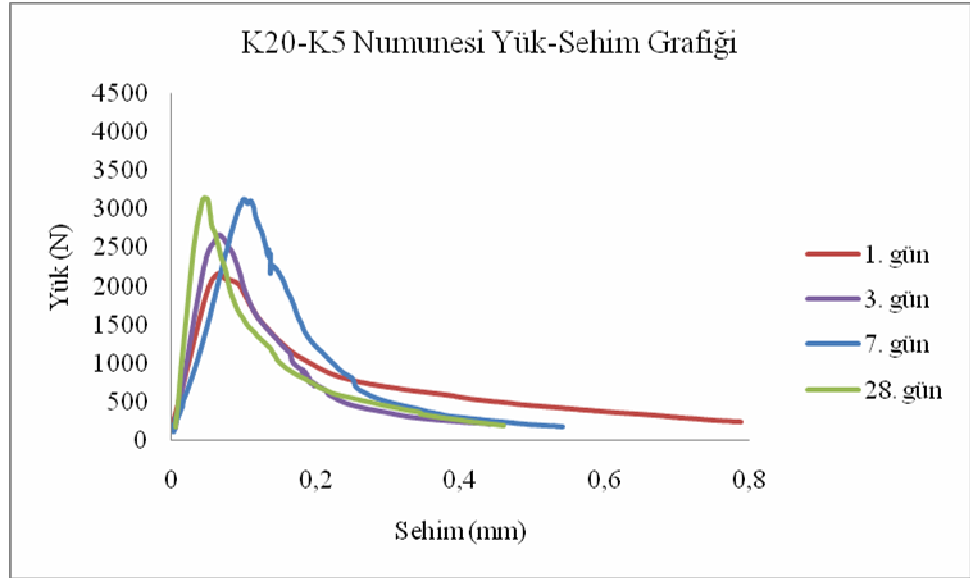
**Şekil A.4:** Tüm numunelerin 28 günlük yük-sehim grafiği.



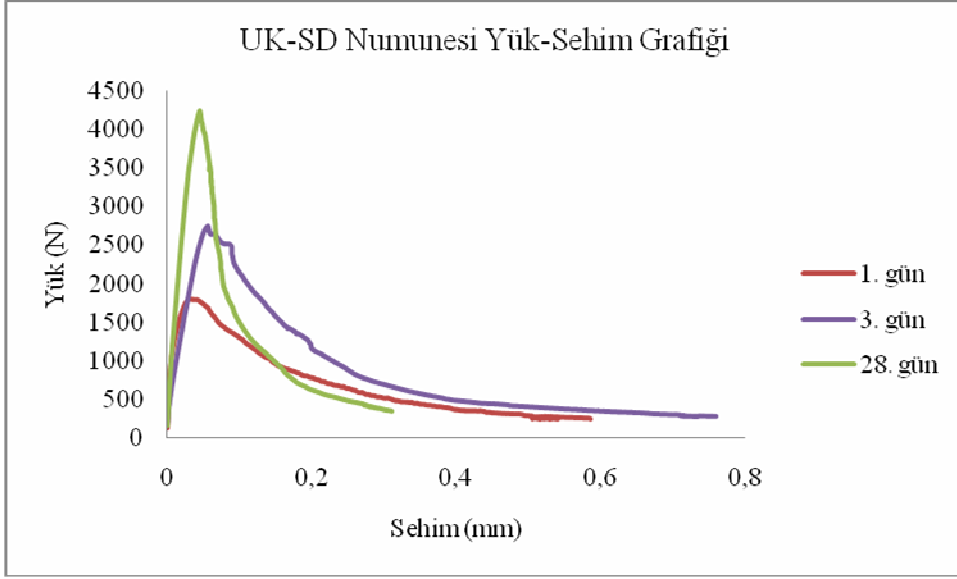
**Şekil A.5:** K20 numunesi yük-sehim grafiği.



**Şekil A.6:** UK numunesi yük-sehim grafiği.



**Şekil A.7:** K20-K5 numunesi yük-sehim grafiği.



**Şekil A.8:** UK-SD numunesi yük-sehim grafiği.



**Şekil A.9:** Basınç deneyi numunesi.



**Şekil A.10:** Yarma deneyi numunesi.



**Şekil A.11:** Elastisite modülü deneyi numunesi.



**Şekil A.12:** Priz süresi deney numunesi.



**Şekil A.13:** Halka deneyi numunesi.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Yusuf Egemen KESLER

**Doğum Yeri ve Tarihi:** Karabük-06.07.1984

**Lisans Üniversite:** Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü