

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



MİNERAL KATKILI NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN BETONLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇAĞLAR DİNÇ

BALIKESİR, MART - 2014

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**MİNERAL KATKILI NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN  
YERLEŞEN BETONLAR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ÇAĞLAR DİNÇ**

**BALIKESİR, MART - 2014**



## KABUL VE ONAY SAYFASI

ÇAĞLAR DİNÇ tarafından hazırlanan "MİNERAL KATKILI NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLAR" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 05.03.2014 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Yrd. Doç. Dr. Arın YILMAZ



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ



Üye  
Yrd. Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tezi BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü yönetim kurulu onaylamıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Cihan ÖZGÜR

.....

## ÖZET

**MİNERAL KATKILI NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI  
KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLAR  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ÇAĞLAR DİNÇ  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ARIN YILMAZ)**

**BALIKESİR, MART - 2014**

Teknolojideki gelişmeler paralelinde hazır beton sektöründe yaşanan ilerlemeler, betonun mekanik dayanımı ve servis ömrü boyunca çevresel etkilere karşı dayanıklılığı açısından yüksek performanslı beton üretimine olanak sağlamaktadır. Betonun bu iki temel özelliği, karışım bileşenleri ve oranları, taze beton performansı ve bakım koşullarından büyük ölçüde etkilenir. Geleneksel beton, taze halde sıkıştırma enerjisi uygulanarak yerleştirilmekte, özellikle şantiyede yaşanan sıkıştırma sorunları betonun sertleşmiş özelliklerinde önemli değişkenliğe sebep olmaktadır.

Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kimyasalların ortaya çıkmasıyla beton teknolojisine uyarlanmış özel bir betondur. KYB; tasarım, üretim ve uygulama safhasında geleneksel betona göre farklı yaklaşımları mecbur kılar. İşçilik masraflarını azaltması, üretimi hızlandırması, çalışma koşullarını iyileştirmesi ve görsel estetik gibi pek çok olumlu özellik, KYB kullanımının getirdiği avantajlar arasında sayılabilir.

Bu çalışmada, uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) ve silis dumanı (SD) kullanılarak C30/37 ve C80/95 sınıfı KYB'lar hazırlanmıştır. Mineral katkı kullanımının KYB'ların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** kendiliğinden yerleşen beton, uçucu kül, granüle, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, basınç dayanımı

## **ABSTRACT**

### **NORMAL AND HIGH STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETE WITH MINERAL ADMIXTURES**

**MSC THESIS**

**ÇAĞLAR DİNÇ**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ARIN YILMAZ)**

**BALIKESİR, MARCH 2014**

Developments in ready-mixed concrete technology, have lead us to the production of high performance concrete in terms of mechanical strength and durability in service life. These two main properties of concrete depend on many factors, such as materials and proportions, fresh concrete performance and curing conditions. Conventional fresh concrete should be compacted in situ however various vibration problems seriously affect the performance of hardened concrete.

Self Compacting Concrete is a special concrete produced by new generation superplasticizers. It differs from conventional concrete in terms of design, production and applications. It reduces labor costs, speeds up the production and provides visual esthetic.

In this study, C30/37 and C80/95 grade self compacting concretes were produced with fly ash, ground granulated blastfurnace slag and silica fume. Effect of these mineral admixtures on the physical and mechanical properties has been examined.

**KEYWORDS:** self compacting concrete, fly ash, ground granulated blastfurnace slag, silica fume, compressive strength



# İÇİNDEKİLER

|  | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| ÖZET.....  | i            |
| ABSTRACT.....  | ii           |
| İÇİNDEKİLER.....   | iii          |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | v            |
| TABLO LİSTESİ.....   | vi           |
| ÖNSÖZ.....   | vii          |
| <br>   |              |
| <b>1.GİRİŞ.....</b>  | <b>1</b>     |
| 1.1.Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....                                   | 2            |
| <b>2.MİNERAL KATKILAR VE BETON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....</b>            | <b>3</b>     |
| 2.1. Uçucu Kül.....  | 4            |
| 2.1.1.Uçucu Küllerin Sınıflandırılması.....                            | 7            |
| 2.1.2.Uçucu Küllerin Kimyasal ve Morfolojik Özellikleri.....           | 8            |
| 2.1.3.Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri.....                    | 10           |
| 2.1.3.1.Katkı Maddesi.....   | 10           |
| 2.1.3.2.Su İhtiyacı.....   | 11           |
| 2.1.3.3.Pompalanabilirlik.....   | 11           |
| 2.1.3.4.Priz Süresi.....   | 11           |
| 2.1.3.5.Hidratasyon Isısı.....   | 11           |
| 2.1.3.6.Terleme.....   | 11           |
| 2.1.3.7.Perdahlama.....  | 12           |
| 2.1.3.8.Erken Yaş Basınç Dayanımı.....                                 | 12           |
| 2.1.3.9.Geçirimsizlik.....   | 12           |
| 2.1.3.10.Sülfata Dayanıklılık.....                                     | 13           |
| 2.1.3.11.Aderans.....  | 13           |
| 2.2.Silis Dumanı.....  | 14           |
| 2.2.1.Silis Dumanı Özellikleri.....                                    | 15           |
| 2.2.2.Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkileri.....                | 16           |
| 2.2.2.1.Su İhtiyacı.....   | 17           |
| 2.2.2.2.Terleme.....   | 17           |
| 2.2.2.3.Hidratasyon Isısı.....   | 17           |
| 2.2.2.4.Priz Süresi.....   | 18           |
| 2.2.2.5.Erken Yaş Basınç Dayanımı.....                                 | 18           |
| 2.2.2.6.İleri Yaş Basınç Dayanımı.....                                 | 18           |
| 2.3.Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....                                   | 19           |
| 2.3.1.Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Soğutulması.....                  | 19           |
| 2.3.1.1.Havada soğutma.....  | 19           |
| 2.3.1.2.Genleştirme.....   | 19           |
| 2.3.1.3.Granülasyon.....   | 20           |
| 2.3.2.Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri.....                  | 20           |
| 2.3.3.Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkileri..... | 21           |
| 2.3.3.1.İşlenebilirlik.....  | 21           |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.3.2.Terleme.....   | 21        |
| 2.3.3.3.Hidratasyon Isısı.....   | 22        |
| 2.3.3.4.Priz Süresi.....   | 22        |
| 2.3.3.5.Hava içeriği.....  | 22        |
| 2.3.3.6.Erken Yaş Basınç Dayanımı.....   | 22        |
| 2.3.3.7.İleri Yaş Basınç Dayanımı.....   | 23        |
| 2.3.3.8.Çekme Dayanımı.....  | 23        |
| 2.3.3.9.Geçirgenlik.....   | 23        |
| 2.3.3.10.Rötre ve Sünme.....   | 24        |
| 2.3.3.11.Sülfata dayanıklılık.....   | 24        |
| 2.3.3.12.Donatı Korozyonu.....   | 24        |
| <b>3.KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON.....</b>                                       | <b>25</b> |
| 3.1.Kendiliğinden Yerleşen Beton Sınıfları.....                                  | 27        |
| 3.2.Kendiliğinden Yerleşen Taze Beton Üzerinde Yapılan Deneyler.....             | 28        |
| 3.2.1.Çökme-Yayıma Deneyi.....   | 28        |
| 3.2.2.V-Hunisi Akış Testi.....   | 29        |
| 3.2.3.Çift Kutu (U Kutusu) Testi.....  | 30        |
| 3.2.4.L Şeklinde Kutu Testi.....   | 31        |
| 3.2.5.Viskozimetre.....  | 31        |
| 3.3.Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları.....                              | 32        |
| 3.4.Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları.....                           | 37        |
| <b>4.DENEYSSEL ÇALIŞMA.....</b>  | <b>40</b> |
| 4.1.Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler.....                                | 40        |
| 4.1.1.Çimento.....   | 40        |
| 4.1.2.Mineral Katkılar.....  | 40        |
| 4.1.3.Kimyasal Katkı.....  | 40        |
| 4.1.4.Agrega.....  | 40        |
| 4.2.Deney Yöntemi.....   | 42        |
| <b>5.DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>                               | <b>45</b> |
| 5.1.Taze Beton Deneyleri.....  | 45        |
| 5.1.1.Çökme-Yayıma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                           | 45        |
| 5.1.2.Çökme-Yayımda T <sub>50</sub> Süreleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi..... | 49        |
| 5.1.3.Hava İçeriği Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                           | 51        |
| 5.1.4.U Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                         | 51        |
| 5.1.5.V Hunisi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                         | 53        |
| 5.1.6.L Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                         | 55        |
| 5.2.Sertleşmiş Beton Deneyleri.....  | 57        |
| 5.2.1.Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                        | 57        |
| 5.2.2.Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                 | 60        |
| 5.2.3.Su İşleme Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....                    | 60        |
| <b>6.SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>   | <b>64</b> |
| <b>7.KAYNAKLAR.....</b>  | <b>69</b> |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1 : Mineral katkı maddeler: 1) Çimento; 2) Granüle yüksek fırın cürufu;<br>3) Silis Dumanı; 4) Uçucu Kül..... | 4  |
| Şekil 2.2 : Uçucu kül taneleri.....   | 9  |
| Şekil 2.3 : Silis dumanı tanecikleri.....   | 16 |
| Şekil 2.4 : Granüle yüksek fırın cürufunun farklı formları a) Genleştirilmiş<br>b) Granüle c) Öğütülmüş.....          | 20 |
| Şekil 2.5 : Granüle yüksek fırın cürufu taneleri.....   | 21 |
| Şekil 3.1 : Çökme yayılma deneyinin yapılışı ve sonucu.....   | 29 |
| Şekil 3.2 : Çökme yayılma deneyinin şematik gösterimi.....  | 29 |
| Şekil 3.3 : V hunisi deneyi aşamaları.....  | 30 |
| Şekil 3.4 : V hunisi deneyinin şematik gösterimi.....   | 30 |
| Şekil 3.5 : Çift kutu testi aşamaları.....  | 31 |
| Şekil 3.6 : L kutusu deneyi şematik gösterimi.....  | 31 |
| Şekil 3.7 : Dügüm noktasında sıkıştırma yetersizliği.....   | 33 |
| Şekil 3.8 : Kolon alt ucunda sıkıştırma yetersizliği.....   | 34 |
| Şekil 3.9 : Sık donatılı bölgeden kendiliğinden yerleşen betonun geçişi.....  | 34 |
| Şekil 3.10 : KYB kullanımının kalıp sistemini değıştireceğı eğimli prefabrike<br>elemanlar.....                       | 38 |
| Şekil 4.1 : KYB üretiminde kullanılan granülometri eğrisi.....  | 42 |
| Şekil 5.1 : C30 ve C80 sınıfı KYB'ların U kutusu değerleri.....   | 53 |
| Şekil 5.2 : C30 ve C80 sınıfı KYB'ların V hunisi değerleri.....   | 55 |
| Şekil 5.3 : C30 ve C80 sınıfı KYB'ların L kutusu değerleri.....   | 56 |
| Şekil 5.4 : C30 betonunun basınç dayanımı gelişimi.....   | 59 |
| Şekil 5.5 : C80 betonunun basınç dayanımı gelişimi.....   | 59 |
| Şekil 5.6 : Yarmada çekme dayanımı gelişimi.....  | 60 |
| Şekil 5.7 : Su işleme derinliği değerleri.....  | 63 |



## TABLO LİSTESİ

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| <b>Tablo 3.1:</b> KYB'lerin karakteristik özellikleri.....                      | 28           |
| <b>Tablo 3.2:</b> KYB'lerin sınıflandırma sistemleri.....                       | 28           |
| <b>Tablo 4.1:</b> Bağlayıcı malzemelerin özellikleri.....                       | 41           |
| <b>Tablo 4.2:</b> Agregaların fiziksel özellikleri.....                         | 41           |
| <b>Tablo 4.3:</b> Elek analizi.....   | 42           |
| <b>Tablo 4.4:</b> Deneysel çalışmada kullanılan bağlayıcı malzeme oranları..... | 43           |
| <b>Tablo 5.1:</b> Deney sonuçları.....  | 46           |

## ÖNSÖZ

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri Yüksek Lisans programı çerçevesinde gerçekleştirilen bu çalışma, yakın gelecekte dünyadaki teknolojik gelişmenin artan hızı ve globalleşen dünyaya ülkemizin de ayak uydurmak zorunda olması nedeniyle, kendiliğinden yerleşen beton kullanımının Türkiye’de yaygınlığının artacağı inancıyla hazırlanmıştır.

Bu çalışmaya değerli görüşleri ve tecrübeleriyle yön veren, çalışma süresince engin hoşgörüsünü eksik etmeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Arın Yılmaz’a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar ve yardıma ihtiyaç duyduğum pek çok konuda önemli katkılar sağlayan Akçansa Çimento San.Tic.A.Ş.’den Kalite Kontrol Müdürü Sn. Ender Derin’e, Çimento Satış Teknik Destek Uzmanları İnş. Yük. Müh. Sn. İsmail Gökalp ve İn.Yük.Müh. Sn.Aydın Sancak’a ayrıca Bursa Beton San.Tic.A.Ş Kalite Kontrol Şefi İnş. Yük.Müh. Sn.A.Hilmi Aytaç’a teşekkür ederim.

Çalışma esnasında, laboratuvarlarından faydalanmama imkan tanıyan ve malzeme analizleri konusundaki önemli yardımlarını esirgemeyen Akçansa Çimento Teknoloji Merkezi çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi-manevi her türlü desteği fazlasıyla sağlayan aileme ve bu yoğun çalışma süresinde desteğini benden esirgemeyen eşim Zeynep Bilge Dinç’e teşekkürü bir borç bilirim.

Çağlar DİNÇ

## 1. GİRİŞ

1980'li yılların başında Japonya'da betonarme yapılarda kalıcılık sorunları incelenmiş ve bu sorunların en önemli sebeplerinden birinin, taze betonun yeterli sıkıştırma işlemi uygulanmadan yerleştirilmesi olduğu saptanmıştır. Özellikle taze betonun sıkıştırılması için gerekli kalifiye işçi yetersizliği, yerleştirilen betonun kalitesini olumsuz etkilemektedir. Öte yandan işçi ne kadar eğitilmiş olursa olsun, taze betona homojen sıkıştırma enerjisi verilebilmesi, özellikle işlenebilirliğin düşük olması halinde pratikte mümkün değildir (Felekoğlu, 2003). Bu problemi çözmek amacıyla sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadan kendi ağırlığı ile sıkışarak yerleşebilecek özel bir tip beton üretilmesi tasarlanmıştır (Okamura ve Ouchi, 1999).

Kendiliğinden yerleşen betonlar vibrasyon gerekmeden istenilen yere yerleşebilen, işlenebilirliği ve homojenliği yüksek olan, ayrıca terleme ve ayrışma problemlerinin yaşanmadığı betonlardır. Ayrışma olmaksızın sık donatılar arasından geçebilen KYB'ler aynı zamanda kendi ağırlığının etkisi ile boşlukları minimuma indirerek yerleşme sağladığı ve düşük su/çimento oranlarında üretilebildikleri için geçirimsizlikleri yüksek, dolayısı ile durabilitesi yüksek olan ve kararlı bir yapıya sahip olan betonlardır. KYB kullanımı vibrasyon gerektirmediği için gürültü kirliliğini engeller ve daha az işçilik gereksinimi sağlar (Özkul, Sağlam, Parlak, Doğan, Mutlu ve Manzak, 2002).

Klasik beton dizaynından farklı olarak kendiliğinden yerleşen betonda; kimyasal katkı, viskozite arttırıcı katkı ve çok miktarda inert veya puzolanik mineral katkının tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton dizaynında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir (Felekoğlu, 2003).



## 1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan puzolanik mineral katkıların taze ve sertleşmiş durumdaki beton özelliklerini nasıl etkilediğini ortaya koymaktır.

Çalışma kapsamında öncelikle literatür araştırması yapılmış, sonrasında deneysel çalışmalardan bahsedilmiştir. Literatür araştırmasının birinci bölümünde, kısaca betonun genel özelliklerinden bahsedilmiş, daha sonra mineral katkı ve beton üzerindeki etkileri anlatılmıştır. Son bölümde ise kendiliğinden yerleşen betonun tanımı ve genel özellikleri ile uygulama alanları ve avantajları hakkında bilgiler verilmiştir. Deneysel çalışmalar kısmında ise aşağıdaki deneyler yapılmış ve bulgular tartışılmıştır.

### 1. Çimento ve mineral katkı ile ilgili deneyler

- Priz süresi tayini
- Puzolanik aktivite deneyi
- Basınç dayanımı

### 2. Taze beton deneyleri

- Çökme-Yayıma deneyi
- V kutusu deneyi
- L kutusu deneyi
- U kutusu deneyi
- Hava içeriği
- Birim ağırlık tayini

### 3. Sertleşmiş beton deneyleri

- Basınç dayanımı
- Yarmada çekme dayanımı
- Su İşleme Derinliği

## 2. MİNERAL KATKILAR VE BETON ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Beton yapımında genellikle kullanılan mineral katkı maddeleri, uçucu kül, silis dumanı, tras, granüle yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikli maddelerdir (Şekil 2.1). Betonda katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka ince taneli durumda olmaları gerekmektedir. Uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemeler, yan ürün olarak elde edildikleri halleriyle, ince taneli malzemelerdir. Öte yandan, volkanik tüf, granüle yüksek fırın cürufu, pişirilmiş kil gibi bazı malzemelerin beton katkı maddesi olarak kullanılabilmesi için öğütülmeleri ve tanelerinin inceliğinin en az portland çimentosu tanelerinkine getirilmeleri gerekmektedir. İnce taneli mineral katkı maddeleri beton üretiminde kullanılan temel malzemelerin (çimentonun, agreganın ve suyun) yanısıra ayrı bir malzeme olarak beton karışımına doğrudan dahil edilmekte ve temel malzemelerle beraber karılmaktadırlar. Bunların kullandıkları oran genellikle, beton karışımında yer alan çimento miktarının %10 - %50'si kadardır. Çoğu zaman, beton karışımında kullanılacak çimento miktarı azaltılmakta ve azaltılan miktar kadar ince taneli katkı maddesi konulmaktadır. Gerek görüldüğünde, ince taneli mineral katkı maddelerinin yanı sıra kimyasal katkı maddeleri de kullanılmaktadır. Elde edildikleri kaynaklara göre mineral katkı maddelerini üç grupta toplamak mümkündür (Erdoğan, 2003):

- (1) Doğal malzemeler (volkanik küller, traslar, taşunu)
- (2) Beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen malzemeler (uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu)
- (3) Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyl)





**Şekil 2.1:** Mineral katkı maddeleri: 1) Çimento; 2) Granüle yüksek fırın cürufu; 3) Silis Dumanı; 4) Uçucu Kül

İnce taneli mineral katkı maddeleri, kullanılan malzemenin tipine ve oranına bağlı olarak, taze ve sertleşmiş betonun birçok özelliğini etkileyebilmektedir (Erdoğan, 2003). Mineral katkı maddesi kullanılarak aşağıda sıralanan amaçlardan birisine veya birden fazlasına ulaşabilmek mümkün olabilmektedir:

- (1) Taze betonun işlenebilmesini artırmak;
- (2) Betonun belirli bir özelliğini (veya belirli birkaç özelliğini) geliştirmek;
  - Terlemeyi ve segragasyonu azaltmak,
  - Hidratasyon ısısını azaltmak,
  - Alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşacak genleşmeyi azaltmak,
  - Su geçirgenliğini azaltmak,
  - Nihai dayanımı artırmak,
  - Sülfatlara karşı dayanıklılığı artırmak.
- (3) Daha ekonomik bir beton elde etmek

Taş unu dışında, betonda ince taneli mineral katkı maddesi olarak kullanılan malzemelerin hemen hemen tümü puzolanik özellikli malzemelerdir.

### 2.1. Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürle çalışan termik elektrik santrallerinde ortaya çıkan bir atık ürünüdür. Termik santrallerde çok ince öğütülerek yakılan kömürden aşağıda belirtilen üç farklı külün elde edilmesi mümkündür.



- Göreceli olarak iri taneli olup baca gazları ile taşınamayan ve kazan tabanına düşen ‘‘taban külü’’ ,
- Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutulmuş ve uzaklaştırılması ile elde edilen ‘‘ham kül’’
- Çok ince taneli olup baca gazları ile taşınan ‘‘uçucu kül’’.

Çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenir. Bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemlerle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanır. Zamanla biriken küller geniş alanları kaplamaya başlar ve santral idaresi için bir problem olurlar.

Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet göstermekte olup, bu santralardan yılda toplam 13 milyon ton kadar uçucu kül elde edilmektedir. Ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir.

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

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar gösterir. Genellikle silisli ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olur : İnce ve küresel taneleri dolayısıyla taze betonda işlenebilmeyi artırır, ayrıca hidrasyon ısısını azaltır . Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturur, çimento hamurundaki boşlukları doldurur ve betona dayanıklılık kazandırır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külden

kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik yani bağlayıcılık özelliği gösterir.

Antrasit kömüründen veya iyi yakılamayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olur. Bu da çimento ve betonda su ihtiyacını artırır; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkiler. Uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilir. Dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerekliğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılır ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilir.

Uçucu külün bilinçli olarak çeşitli alanlarda kullanımı hem kullanıcı, hem de külü üreten için ekonomik avantaj sağlar, atık madde ortadan kalktığı için çevre korunmuş olur.

Ayrıca, kullanıcı ürettiği yeni ürünlerde veya uygulamalarında çeşitli avantajlar elde eder. Bütün bu olumlu hususlara rağmen, kullanılarak değerlendirilen uçucu kül miktarları santrallarda elde edilen miktarların küçük bir yüzdesini geçememekte olup, dünya ortalaması olarak %15 civarında rakamlar verilmektedir.

Çeşitli ülkelerde uçucu küllerin önemli miktarlarda kullanılmaya başlaması baraj inşaatları sırasında ve betonda hidratasyon ısını düşürmek amacı ile olmuştur. Örneğin A.B.D de ilk kullanım 1940'lı yıllardan önce Hoover daha sonra Hungry Horse barajlarındadır. Ülkemizde ise 1960'lı yıllarda Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatlarında uçucu kül kullanılmasına karar verilmiştir. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nün baraj uygulamaları dışında Karayolları Genel Müdürlüğü bazı köprü ve yol inşaatlarında deneme amacı ile uçucu kül kullandı. Uçucu küllü çimento hemen hiç üretilmedi. Katkılı çimentolarda ise kısıtlı miktarda kül kullanıldı. Geçen süre içinde ülkede uçucu kül kullanımı bu tür uygulamalarda sınırlı kaldı. Kullanılan uçucu kül miktarları yılda elde edilenin %1'ine bile ulaşamadı. Ancak son yıllarda, özellikle hazır beton endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'dan uyarlanan yeni çimento ve beton endüstrilerinde uçucu küle olan ilgiyi arttırmış bulunmaktadır (Türker, Erdoğan, Katnaş, Yeğinoğlu, 2004).

TS EN 450-1 Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Tarifler, Özellikler Ve Uygunluk Kriterleri standardında "puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'den meydana gelen toz halindeki küresel ve camsı tanecikler" olarak nitelendirilen uçucu küller, TS EN 206-1 Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans,



İmalat ve Uygunluk standardında “Tip II” kapsamında olup, “betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betona özel nitelikler kazandırmak amacıyla kullanılan ince öğütülmüş inorganik puzolanik veya gizli hidrolik özelliği bulunan malzemeler” olarak tanımlanmıştır.

### 2.1.1. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu kül, termik santrallarda pulverize kömürün yanması sonucu meydana gelen baca gazları ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanan önemli bir yan üründür. Kömürün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucu meydana gelen ergimiş malzeme soğuyarak, gaz akışı ile kısmen veya tamamen küresel şekilli kül taneciklerine dönüşmektedir. Bu kül tanecikleri çok ince (0,5- 150 mikron) olup, baca gazları ile sürüklenmeleri nedeniyle, uçucu kül olarak adlandırılmaktadır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ve  $\text{CaO}$  olup, bunların miktarları uçucu külün tipine göre değişmektedir. Ayrıca  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3$ , alkali oksitler de minör bileşen olarak bulunmaktadır. Uçucu küldeki temel oksitlerden  $\text{SiO}_2$  %25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  %10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  %1-15 ve  $\text{CaO}$  %1-40 oranlarında bulunmaktadır. Bu farklı aralıklardaki değerler uçucu külün tipini karakterize etmektedir.

Uçucu küllerin sınıflandırılmasında, kimyasal bileşen yüzdesine göre esas olarak ASTM C618 ve TS EN 197- 1 standartları baz alınmaktadır (Türker vd., 2004).

ASTM C618 standartlarına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılırlar:

- a) F sınıfına, bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  yüzdesi %70'den fazla olan uçucu küller girmektedir. Aynı zamanda bu küllerde  $\text{CaO}$  yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da adlandırılırlar. F sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğe sahiptirler.
- b) C sınıfı uçucu küller ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretilen ve toplam  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  miktarı %50'den fazla olan küllerdir. Aynı zamanda, C sınıfı uçucu küllerde  $\text{CaO} > \%10$  olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar.

TS EN 197- 1'e göre sınıflandırmada ise uçucu küller silissi (V) ve kalkersi (W) olmak üzere iki gruba ayrılırlar:



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

### 2.1.2. Uçucu Küllerin Kimyasal ve Morfolojik Özellikleri

Uçucu külün kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orijini ve proses koşullarına ( kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfirizasyon gibi ) bağlıdır.

Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ve  $\text{CaO}$  olup, diğerleri  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$  ve alkali oksitlerdir. Ayrıca, yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, berilyum, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunabilmektedir.

Temel oksitler olan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ 'in miktarları, uçucu külün silissi veya kireçsi yapıda olmasına göre geniş aralıkta değişmektedir. Buna göre, uçucu külde  $\text{SiO}_2$  %25-60,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  %10-30,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  %1-15 olarak ve  $\text{CaO}$  %1-40 değerleri arasında bulunmaktadır.

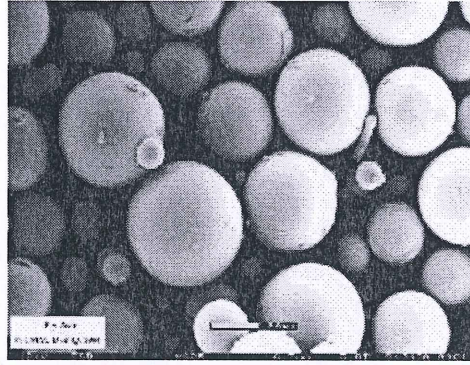
Diğer oksitlerden  $\text{MgO}$  en fazla %5, alkalik oksitler ( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ ) %5'in altında bulunmaktadır.  $\text{SO}_3$  genellikle % 0,2-2,5 arasında değişmekle birlikte, kömürün yapısı ve proses koşullarına göre, %10'a kadar yükselmektedir. Ancak standartlardan özellikle TS EN 450 standardı,  $\text{SO}_3$  değerini en fazla %3 olarak dar bir aralık ile sınırlamaktadır.

Kızdırma kaybı, esas olarak kömürdeki yanmamış karbona karşılık gelmekle birlikte, kömürdeki hidratlar veya karbonatların bozunması ile ortaya çıkan

bağlanmamış su veya CO<sub>2</sub> kaybını da içine almaktadır. Kızdırma kaybı, %1- 10 arasında değişmektedir.

Uçucu külde reaktif silis ve reaktif kireç, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan ve dayanım gelişiminde önemli rolü olan kalsiyum silikat hidrat jeli oluşturan silisyum ve kalsiyum oksitleri temsil etmektedir. Özellikle reaktif silis, külün aktif bileşeni olup, puzolanik reaksiyonlara girmek üzere, alkali ortamda çözünen silistir. Bu bileşik, amorf veya camsı faz halinde bulunurken; mullit ve kuvars gibi silisli diğer bileşenler inert olup kristalize halde bulunurlar. Reaktif silis miktarının, uçucu külün tipine bağlı olmaksızın en az %25 olması gerekmektedir. Reaktif kireç ise, düşük kireçli küllerde %10'un altında olmakta; yüksek kireçli küllerde %10- 15 arasında değişmektedir.

Uçucu külde, büyüklükleri 0,5µm- 150µm arasında değişen hem camsı küresel, hem de düzensiz şekilli tanecikler bulunmaktadır. Bu taneciklerin şekil ve büyüklük açısından farklılıkları, uçucu külün tipinden (düşük veya yüksek kireçli) kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.2: Uçucu kül taneleri

Camsı küresel şekilli tanecikler, içi boşluksuz küresel yapılar (solid glassy sphere); boşluklu küreler (cenosphere, hollow spheres); büyük bir küre içinde, küçük küreler kümesi içeren yapılar (pleurosphere); yüzeyi düzensiz dağılmış şekilsiz boşluklar içeren yapılar, yüzeyinde sıvı damlacıkları bulunan yapılar; yüzeyi kristal ile kaplanmış yapılar (dermasphere) deforme yapılar; yüzeyinde şekilsiz birikimler olan yapılar gibi çeşitli şekiller halinde bulunabilir.



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

Düşük kireçli küllerde, çoğunlukla camsı faza karşılık gelen, içi boşluksuz tam küresel tanecikler ve bunu yanısıra senosfer ve plerosfer bulunmakta olup; bu küller şekil dağılımı açısından genellikle homojen olan mikroyapıya sahiptirler.

Yüksek kireçli küllerde, mikroyapı içinde hem küresel hem de köşeli, düzensiz şekilli taneciklerin bir arada bulunması sonucunda, homojen olmayan şekil dağılımı mevcuttur. Ayrıca küresel taneciklerin yüzeyi de düşük kireçli küller kadar düzgün değildir.

Taneciklerin şekli ve büyüklük dağılımları, taze betonun su ihtiyacı ve işlenebilirlik gibi reolojik özelliklerine etki etmektedir. Bu etki özellikle küresel taneciklerin kayganlaştırıcı (lubricant) nitelik taşıması ve dolgu maddesi (microfiller) özelliğine sahip olma; şekilsiz, pürüzlü yüzeye sahip olanların su ihtiyacını arttırma şeklinde olmaktadır. Ayrıca, uçucu külün tane büyüklük dağılımının çok değişken olması halinde de su ihtiyacı artmaktadır.

Uçucu külün granülometrik bileşiminin çoğunun  $40\mu\text{m}$ 'nin altında olması (10-20 $\mu\text{m}$ ) ve şeklinin de genelde küresel olması puzolanik aktiviteye olumlu etki etmektedir. Özellikle yüzeyi pürüzsüz ince küresel tanecikler büyük yüzey alanına sahip olduğu için kireç-silikat reaksiyonlarına daha hızlı girmektedirler.

Buna bağlı olarak yüksek kireçli külün aktivitesinde kristalize aktif fazlar (anhidrit, kireç) ve az camsı fazı rol oynamakta, düşük kireçli de ise taneciklerin şekli, büyüklük dağılımı ve camsı fazın fazlalığı önem taşımaktadır (Türker vd, 2003).

### **2.1.3. Uçucu Külün Beton Özelliklerine Etkileri**

#### **2.1.3.1 Katkı Maddesi**

Uçucu küller genellikle beton katkı maddesi olarak çimento ağırlığının %15-50'si civarında kullanılabilir. Çimentonun bir kısmı yerine ya da çimento miktarında azaltma yapılmaksızın ince agregalar olarak kullanılabilirler.



### 2.1.3.2 Su İhtiyacı

Genellikle uçucu külün, çimentonun bir kısmı yerine kullanıldığı betonlardaki su ihtiyacı, aynı çökme değerine sahip uçucu külsüz betona göre daha az olmaktadır. Yapılan araştırmalar çimento ağırlığının %20-30'u arasında kül kullanılan betonların, aynı çökme değerindeki külsüz betonlardan % 7 daha az su ihtiyacı olduğunu göstermiştir. Uçucu küllü betonların su ihtiyacı tanelerin inceliğine bağlı olarak değişir. İncelik arttıkça su ihtiyacı da artar. Ancak çoğunluğu küresel taneciklerden oluşan uçucu küller, içsel sürtünmeyi azaltıklarından, daha az su gerektirirler.

### 2.1.3.3 Pompalanabilirlik

Uçucu kül kullanımı pompalanabilirliği artırır. Özellikle ince agreganın ya da çimento dozajının az olması durumunda uçucu kül kullanımının pompalanabilme üzerindeki etkisi daha çarpıcı olmaktadır. Ayrıca küresel tanecikler beton içerisindeki içsel sürtünmeyi ve pompa cidarları ile beton arasındaki sürtünmeyi azaltarak pompalanabilmeyi artırır.

### 2.1.3.4 Priz Süresi

Uçucu kül katkılı betonların priz süresi katkısız betonların priz sürelerinden daha uzun olmaktadır. Priz süresi çimento tipi, çimento miktarı, çimento inceliği, hamurun su içeriği, çözünebilen alkaliler, diğer katkıların kullanımı, uçucu kül miktarı, tipi ve inceliğine göre değişebilmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir.

### 2.1.3.5 Hidratasyon Isısı

Uçucu kül katkılı betonlarda daha az portland çimentosu (daha az  $C_3A$  ve  $C_3S$ ) kullanıldığından bu tür betonların hidratasyon ısıları daha az olmaktadır. Uçucu külün bu özelliği baraj gibi kütle betonlarının yapımında kullanım olanağı sağlar.

### 2.1.3.6 Terleme

Uçucu kül ilave edilmesiyle beton içerisinde katı malzemenin toplam yüzey alanı artmaktadır. Bu durumda, terlemeyle beton yüzeyine hareket etme eğilimindeki serbest suyun büyük bir bölümü katı maddelerin yüzeyinde tutunacak ve terleme

azalacaktır. Ayrıca terleme suyunun hareket ettiği kanallar külün dolgu etkisi neticesinde küçülmekte ya da tamamen kapanarak suyun hareketi engellenmektedir.

#### **2.1.3.7 Perdahlama**

Uçucu kül içeren betonların prizi, külsüz betonlara kıyasla daha geç olduğundan perdahlama da gecikmektedir. Priz süresinin artması plastik büzülme çatlaklarının oluşma riskini arttırmakta, yüksek buharlaşmanın olduğu durumlarda yüzeyde kabuklanma görülebilmektedir. Çok sulu küllü beton karışımlarında kül bünyesinde bulunan ve oldukça hafif olan yanmamış karbon parçacıkları yüzeye çıkmakta ve beton yüzeyinin görünümünü bozmaktadır. Bazı durumlarda kül kullanımıyla beton yapışkan hale gelebilmekte ve yüzey düzeltme işleminde zorluklar yaşanabilmektedir.

#### **2.1.3.8 Erken Yaş Basınç Dayanımı**

Yapılan çalışmalarda uçucu külün çimento yerine kullanılması halinde betonun dayanım kazanma hızının yavaş ve erken basınç dayanımının düşük olduğu görülmüştür. Bununla birlikte bu betonlarda nihai dayanım değerleri oldukça yüksektir. İlk günlerdeki dayanım artışı külün inceliğine ve tipine göre değişiklik göstermektedir. C tipi küllerin ilk zamanlarda dayanıma katkısı F tipi küllerinkinden daha fazladır. Ayrıca külün inceliğinin artması erken yaşlardaki dayanım değerlerinin nispeten yüksek olmasını sağlamaktadır. Bütün betonlarda dayanım ve dayanım gelişme hızı kür koşullarından etkilenir. Uçucu küllü betonlardan tam fayda sağlamak, kür sürelerini uzun tutmak ile elde edilir. Çimentoyu daha ince öğüterek erken dayanımlarda görülebilecek azalmanın önüne geçilebilir.

#### **2.1.3.9 Geçirimsizlik**

Uçucu küllü betonlarda puzolanik reaksiyon sonucu bağlanan kirecin tükenmesi ve oluşan ilave bağlayıcı yapının gözenekleri doldurması nedeniyle geçirimsizlik daha düşüktür. Uçucu küller ayrıca inert malzeme olarak da beton içerisindeki boşlukları doldurarak geçirimsizliğin azalmasını sağlarlar.

Puzolanik reaksiyon neticesinde betonun daha geçirimsiz hal almasıyla dışarıdan nem girişi engellenmekte ve alkali ve reaktif silisin oluşturduğu jel ortamda



mevcut olsa bile nem olmadığı için genleşme reaksiyonu oluşmamaktadır. Külün çimento yerine kullanımıyla birlikte çimento kaynaklı alkali miktarında da azalma olacaktır. Alkali silika reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için reaktif silisin yüksek pH'lı bir ortamda çözünebiliyor olması gerekmektedir. Puzolanik reaksiyon sayesinde kireç tükenmekte ve ortamın pH'ı düşmektedir. Bu durum reaktif silisin çözünebilirliğini azaltmaktadır. Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı kül kullanımıyla alkali silika reaksiyonu büyük ölçüde engellenmiş olmaktadır.

### **2.1.3.10 Sülfata Dayanıklılık**

Sülfat iyonları asıl olarak hidratasyon ile açığa çıkan kireç ile reaksiyona girer. Puzolanik reaksiyon neticesinde kireç tükenir ve sülfat iyonlarıyla zararlı reaksiyon gerçekleşmez. Ayrıca çimentonun yerine kullanılan kül, C<sub>3</sub>A bileşeninin daha az bulunması anlamına gelir, böylece sülfata direnç artmış olur. Bunun dışında puzolanik reaksiyon neticesinde geçirimsizliğin azalmasıyla birlikte sülfat iyonlarının betona difüzyonu da zorlaşmaktadır.

### **2.1.3.11 Aderans**

Taze betonun terlemesi halinde donatının alt kısmında bir miktar su toplanması ve bu suyun daha sonra buharlaşması sonucunda oluşan hava cepleri nedeniyle donatı-beton aderansı azalır. Kül kullanımı ile terleme azaldığından, küllü betonlardaki aderans külsüz betonlara kıyasla daha iyi olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Uçucu küller geleneksel betonlarda kullanımının yanı sıra;

- Beton boruların yapımında,
- Asfalt ve beton yol yapımı, yol temellerinin tabakalarının hazırlanmasında,
- Zemin stabilizasyonunda,
- Sanayi seramiklerinin üretiminde ve kireç yapımında
- Özel işlemler neticesinde hafif agrega olarak,
- Yalıtım malzemesi olarak (akustik ve termik yalıtım bloklarında),
- Atıksuların içinde bulunan organik kaynaklı kirleticilerin tutulmasında,
- Cam yapıcı temel oksitleri içermesi nedeniyle cam ve seramik üretiminde,
- Maden sahalarında asidik nitelikteki drenaj sularını nötrleştirmek ve ağır metallerin çözünürlüklerini düşürmek amacıyla da kullanılabilir.



## 2.2. Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen, endüstriyel bir atık olan silis dumanının değerlendirilmesi konusundaki ilk çalışmalar çevre koruması amacı ile 1950'li yıllarda Norveç' de başlamıştır. Çok ince taneli ve yüksek oranda amorf silis içeriği nedeni ile etkin bir puzolan olan bu maddenin çimento katkısı olarak kullanımı gene Norveç' de 1969 yılında denendi. Bu konudaki uygulamalar ve silis dumanının beton içindeki davranışı ile ilgili araştırmalar daha ziyade İskandinav ülkelerinde olmak üzere 1980'li yılların başına kadar oldukça yavaş gelişti. Beton için akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanıma girmesi, silis dumanının birçok beton özelliği üzerindeki olumlu etkilerinin ortaya çıkması ve çevre kirliliğine karşı endüstriyel atıkların daha sıkı kontrolü gibi faktörler silis dumanı konusundaki çalışmaların son yirmi yıl içerisinde hızla yaygınlaşmasına neden olmuştur.

Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılardaki gelişmeler sonucu yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonların vazgeçilmez bir bileşeni haline gelen silis dumanı bugün endüstrisine problem yaratan bir atık değil para ile alınıp satılan değerli bir madde haline gelmiştir. Eldeki rakamlara göre dünyadaki yıllık silis dumanı üretimi 1 milyon ton civarında olup bunda A.B.D' nin payı 130.000ton, Norveç'inki ise 120.000 ton kadardır.

Silis dumanı bazı ülkelerde katkılı çimento üretiminde kullanılmakta olup portland silis dumanlı çimento türü Avrupa ve Türkiye standartlarında yer almaktadır. Ayrıca, kimyasal katkı ve silis dumanı ile başka maddeleri içeren patentli karışımlar klinker ile birlikte öğütülerek yüksek dayanım ve performanslı çimentolar elde edilebilmektedir.

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya prefabrik yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler, yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, deniz yapıları, yüksek dayanımlı hafif beton elemanlar, beton elemanları onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir.

Türkiye’de silis dumanı Antalya’da Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilmektedir. Ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozları olarak yıllık üretim miktarları toplam 1000-2000 ton arasında değişmektedir. Buradan elde edilen silis dumanı 1980’li yılların sonlarından itibaren özellikle üniversitelerimizde çimento ve beton katkı maddesi olarak çeşitli araştırmalarda kullanılmıştır. Bileşimleri Tablo 2.1’de verilen silis dumanları zaman zaman inşaat, yalıtım ve ateş tuğlası endüstrilerinden alıcı bulmuştur. Son yıllarda bazı hazır beton üreticileri tarafından kullanılmaktadır (Yeğınobalı, 2009).

### 2.2.1. Silis Dumanı Özellikleri

Silisyum metali ile %75 ferrosilisyum alaşımları veya bunların karışımlarından elde edilen silis dumanlarının bileşimlerinde  $\text{SiO}_2$  miktarı %85i geçmekte, genellikle %90 civarında olmaktadır.

Silis dumanı çoğunlukla değişik tonlarda gri renktedir.  $\text{SiO}_2$  renksiz olduğuna göre rengin koyuluğu karbon miktarına bağlı olarak artar. Demir oksit fazlalığı ise renge hafif kahverengi bir ton verir.

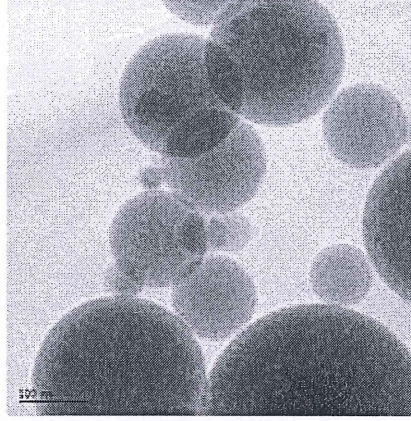
Silis dumanının özgül ağırlığı ortalama 2,20 civarındadır. Bu değer alaşım türüne ve kaynağına göre biraz değişebilmektedir.

Silis dumanının gevşek birim ağırlığı 130-430  $\text{kg/m}^3$  arasında değişir. Genellikle %50 silis dumanı içeren sulandırılmış (bulamaç) halinde bu değer 1300-1400  $\text{kg/cm}^3$  düzeyine kadar yükselebilir. Piyasaya sıkıştırılmış olarak sevk edilen silis dumanında ise birim ağırlık ortalama 550  $\text{kg/cm}^3$  civarındadır.

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgül yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile tayin edilememektedir. Bunda cihaz hücresine %50 boşluk oranı ile sıkıştırılmasındaki güçlük rol oynar. Çok ince taneli cisimlerde özgül yüzey Azot Adsorpsiyon (BET) metodu ile tayin edilebilmektedir. Burada özgül yüzey, tanelerin dış yüzeyleri ile içlerindeki açık boşlukların iç yüzeylerinden oluşan alanı 1 molekül kalınlığında bir tabaka ile kaplayacak azot gazı miktarından hesaplanmaktadır. Bu yöntem, taneler arasından hava geçiş hızını esas alan Blaine metodundan farklı olduğundan iki metotla elde edilen sayısal sonuçların doğrudan karşılaştırılması



mümkün değildir. Ancak, aşağıdaki değerler gene de silis dumanının inceliği konusunda bir fikir vermektedir.



Şekil 2.3: Silis dumanı tanecikleri

|                     | Metod     | Özgül Yüzey (m <sup>2</sup> /kg) |
|---------------------|-----------|----------------------------------|
| Portland Çimentosu  | Blaine    | 300-400                          |
| Uçucu Kül           | Blaine    | 400-700                          |
| Granüle Y.F. cürufu | Blaine    | 350-600                          |
| Silis Dumanı        | Azot(BET) | 13000-20000                      |

Silis dumanındaki karbon büyük yüzey alanı nedeni ile sonucu etkilediğinden özgül yüzey değerleri ile birlikte karbon miktarının veya kızdırma kaybının da verilmesi önerilmektedir.

Silis dumanının tane boyutu genelde 1µm'dan küçük olup ortalama tane boyu 0.1 µm civarındadır. Ortalama çimento tanesinin çapı 10µm kabul edilirse silis dumanının çimentodan 100 kere daha ince olduğu sonucuna varmak mümkündür. Tane boyu dağılımı silis dumanı türüne ve kaynağına bağlı olarak değişir. Genellikle silis dışı gayri saflıkları içeren taneler 45 µm 'dan daha büyük olabilirler. Ancak bunların ağırlıkça miktarı %5-6 'yı geçmez (Yeğinoğlu, 2009).

### 2.2.2. Silis Dumanının Beton Özelliklerine Etkileri

Silis dumanı katılan çimento hamurunda belirli bir kıvam için gerekli su ihtiyacı, yapışkanlık, viskozite, terleme ve özellikle agrega ara yüzeyindeki içyapı değişikliğe uğrar. Bu değişiklikler, ileride değinileceği gibi, taze ve sertleşmiş betonun bazı özelliklerini de etkiler.



### 2.2.2.1 Su İhtiyacı

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili hale getirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını artıracak ve kıvamı olumsuz etkileyecektir. Dolayısı ile sonuç hamurdaki çimento ve silis dumanı miktarları ile su/bağlayıcı malzeme (s/b) oranısı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilecektir. Araştırmalara göre çimentonun %5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla değiştirmemekte, daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır. Benzer şekilde, çimentonun %7,5'dan fazlası yerine silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskozitesinin arttığı, daha az miktarlarda ise azaldığı bulunmuştur.

### 2.2.2.2 Terleme

Yüksek dozajlı veya düşük s/ç orantılı hamurlara katılan silis dumanı yapışkanlığı artırmaktadır. Buna neden olarak bağlayıcı malzeme taneleri arasında temasın artması ve iç terlemenin azalması gösterilmektedir.

### 2.2.2.3 Hidratasyon Isısı

Çimentonun belirli bir miktarı yerine katılan puzolanlar hamurda açığa çıkan hidratasyon ısısını azaltırlar. Silis dumanı katıldığında ise durum başlangıçta biraz farklı olabilmektedir. Araştırmacılar silis dumanı katkısının ilk 2-3 saat içinde hidratasyon ısısını artırdığını, ancak ileri yaşlarda eşit çimento dozajı bazında açığa çıkan ısıyı azalttığını belirtmektedirler. Başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidratasyonunu hızlandırması ile açıklanmaktadır.

Silis dumanı katkısının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi çimentonun ne kadarı yerine katıldığına ve akışkanlaştırıcı kullanma durumlarına bağlı olarak da değişebilmektedir. Silis dumanı katkısının betonda sadece hidratasyon ısısını azaltmak amacı ile kullanılması tavsiye edilmemektedir.

#### 2.2.2.4 Priz Süresi

Silis dumanı katkılı çimento hamurları genellikle daha geç priz alırlar. Katkı miktarı çimento ağırlığının %10' unu geçmedikçe bu etki önemsenmeyebilir. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkıların da priz geciktirici etkileri olabilmektedir.

#### 2.2.2.5 Erken Yaş Basınç Dayanımı

Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanısıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısı ile betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir. Bazı araştırmacılara göre göre silis dumanı katkısının beton dayanımına olan etkisi agrega-hamur ara yüzeyinin kuvvetlenmesinden dolayıdır. Zira aynı çimento/silis dumanı oranında silis dumanı katkılı ve katkısız çimento hamurlarının dayanımları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Diğer taraftan, en önemli faktörün daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da öne sürülmektedir.

#### 2.2.2.6 İleri Yaş Basınç Dayanımı

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendini gösterir. Ancak s/b oranı 0,40 civarına indirilerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek mümkündür. Süperakışkanlaştırıcı kullanıp s/b oranını 0,40' da sabit tutarak dökülen betonlarda çimentonun %30' una kadar varan miktarlarda katılan silis dumanı ilk birkaç günden itibaren dayanımları artırmaktadır. İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılara göre silis dumanlı betonlarda dayanım 90 günden sonra düşebilmektedir. Diğer taraftan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını bildirenler de vardır.

Diğer puzolanlarda olduğu gibi silis dumanının olumlu etkileri iyi bakım koşulları ile geliştirilebilmektedir. Ancak diğer bir husus bakım yapılsa dahi silis dumanı katkısının betonlarda 28 günden sonraki dayanımları azaltmasıdır. Tüm silis



dumanlı betonlar için geçerliliği tartışmalı olan bu davranışa diğer puzolan katkılı betonlarda da rastlanılmaktadır (Yeğinoğlu, 2009).

### **2.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufu**

Granüle Yüksek fırın cürufu (GYFC), demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan bir yan üründür. Demir üretiminde hammadde olarak demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürü kullanılmaktadır. Demir cevheri demir oksit ile birlikte silis, kükürt ve alümin gibi demir dışı maddeleri de içermektedir. Yüksek fırındaki işlem sonucu bu maddeler ayrışır. Kireçtaşı bu süreçte yardımcı bir hammadde olarak görev yapar. Kok kömürü ise gerekli olan yakıtı sağlar.

Hammaddelerle sürekli olarak beslenen yüksek fırınlarda sıcaklık 1600°C'lere ulaşmaktadır. Yüksek sıcaklık sonucu ergiyen malzemeler üstte cüruf ve altta pik demir olacak şekilde fırının alt kısmında toplanır. Ergimiş cüruf ve demir ayrı ayrı tahliye edilir. Yaklaşık 1500°C'de olan granüle yüksek fırın unun tahliye edilmesinden sonra uygulanacak soğutma yöntemi, oluşacak ürünün özelliklerini ve kullanım yerini belirler (Erdoğan, 2004).

#### **2.3.1. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Soğutulması**

##### **2.3.1.1 Havada soğutma**

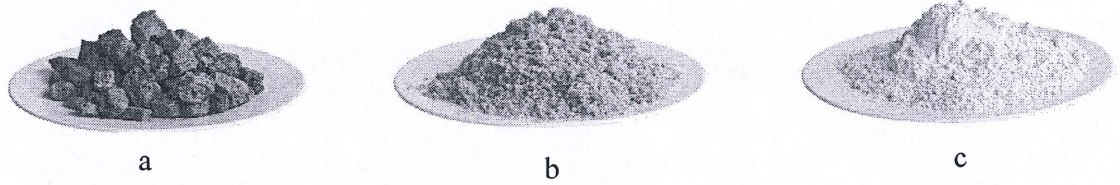
GYFC, havada soğutma yöntemiyle ile atmosferik koşullarda yavaş bir şekilde soğutulur ve minerolojik olarak iri kristalli bir malzeme oluşur. Camsı fazı düşük olan bu malzeme kırılarak beton veya asfalt agregası ya da stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilir.

##### **2.3.1.2 Genleştirme**

GYFC kontrollü miktarda su, basınçlı hava ve buhar etkisiyle soğutulduğu takdirde gözenekli yapıda, iri kristal taneli bir malzeme oluşur. Bu malzeme hafifliği nedeniyle hafif beton üretiminde kullanılabilir.

### 2.3.1.3 Granülasyon

Genleştirmeye oranla daha fazla miktarda su kullanılarak yapılan ani soğutma işlemi sonucu kuma benzer amorf(camsı) yapıda, hidrolik özelliği olan granüle bir malzeme oluşur. Bu malzeme değirmende öğütülerek “öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu” elde edilir. 1 ton granüle GYFC elde etmek için 10 ton suyun harcandığı yöntem en verimli yol olsa da ekonomik değildir. Son yıllarda bunun yerine peletleme yöntemi tercih edilmektedir. Peletleme sonucu elde edilen malzemenin 4mm’den küçük olan kısmı camsı yapıda olup öğütülerek granüle GYFC elde edilir (Tokyay ve Erdoğdu, 2011).

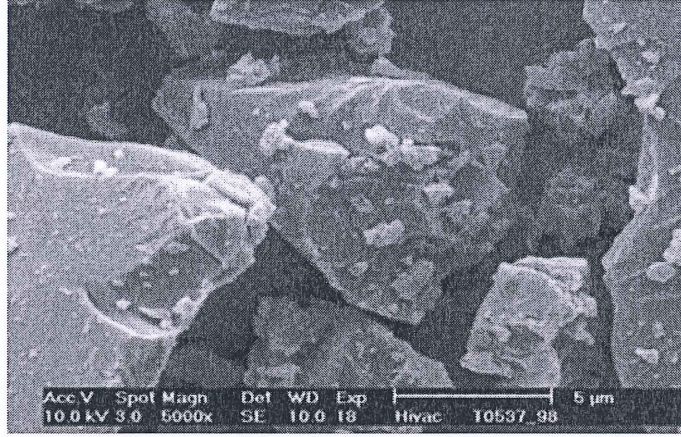


Şekil 2.4: Granüle yüksek fırın cürufunun farklı formları a) Genleştirilmiş  
b) Granüle c) Öğütülmüş

### 2.3.2. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Özellikleri

Granüle yüksek fırınlarda pik demir elde etmek için demir cevherinden demir dışı maddeleri ve demire bağlı olan oksijeni ayırmak esas amaçtır. GYFC, Portland çimentosuna oranla daha az kalsiyum oksit(CaO) ve daha fazla silisyum dioksit(SiO<sub>2</sub>) içermektedir. GYFC’nun yoğunluğu çimentoya oranla düşüktür. İncelik cürufun öğütülmesine göre farklılık gösterebilmektedir. GYFC’nun Portland çimentosuna oranla bir diğer farkı da alüminyumoksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ve kükürt (SO<sub>3</sub>) miktarının yüksek olmasıdır. Bileşenlerin oranı bağlayıcı malzemelerin kimyasal özelliklerini etkilediği gibi özellikle cürufun yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içeriği çimentoya göre daha zor öğütülmesine neden olmaktadır.





**Şekil 2.5:** Granüle yüksek fırın cürufu taneleri

GYFC, Portland çimentosuna oranla daha açık renklidir. Bunun nedeni çimentoya gri rengini kazandıran  $C_4AF$  bileşenin granüle yüksek fırın cürufunda oluşmamasıdır. Bu renk farklılığı beton fazında da gözlemlenmektedir. Bu durum bazen yanlış anlamalara neden olmaktadır. Çimento ve betonda renk kalitenin bir göstergesi değildir. Hatta açık renk brüt yüzeylerde estetik açıdan tercih edilebilir.

### **2.3.3. Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Beton Özelliklerine Etkileri**

#### **2.3.3.1 İşlenebilirlik**

Granüle yüksek fırın cürufunun taneleri köşeli olmasına rağmen camsı, pürüzsüz ve daha az emici bir yapıdadır. Ayrıca, Portland çimentosuna oranla özgül ağırlığı daha düşüktür ve böylece aynı dozajda daha fazla çimento hamuru oluşmasını sağlar. Bu nedenlerle betonda işlenebilirlik olumlu yönde etkilenir. GYFC betonda hidratasyon reaksiyonunu yavaşlattığı ve reaksiyon ısısını düşürdüğü için betonda kıvam kaybını azaltmaktadır. İşlenebilirlik ve su ihtiyacı cürufun inceliğine ve miktarına göre değişmektedir (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.2 Terleme**

Terleme, taze betonda suyun yüzeye doğru hareketi olarak tanımlanır. Terleme kapasitesi ve miktarı; bağlayıcı malzeme miktarına ve inceliğine, çimento reaktivitesine, ince malzeme miktarına, hava içeriğine bağlıdır. Granüle yüksek fırın cürufu çimentoda hidratasyon reaksiyonları için gerekli su ihtiyacı Portland çimentosuna oranla daha azdır. Yapılan araştırmalar sonucu Portland çimentosuna

oranla daha ince olan granüle yüksek fırın cürüflu çimentonun, betonda terleme kapasitesini ve hızını bir miktar azalttığı tespit edilmiştir (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.3 Hidratasyon Isısı**

Granüle yüksek fırın cürüflu çimentonun en önemli ve etkin faydalarından biri hidratasyon ısını düşürmesidir. Bilindiği üzere hidratasyon ısı kütle betonlarında termal(ısı)l gerilmelere neden olmaktadır. Özellikle sıcak hava koşullarında büyük kesitli betonlarda iç ve dış sıcaklık farkı, telafisi olmayan ısıl çatlaklara neden olmaktadır. Bu nedenle granüle yüksek fırın cürüflu çimentonun kütle betonlarında kullanımı idealdir (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.4 Priz Süresi**

Granüle yüksek fırın cürüflu çimentoda hidratasyon ısısının düşük olması, çimento içindeki bileşenlerin reaksiyonlarının daha yavaş gelişmesi nedeniyle priz süresi uzamaktadır. Hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde betonun hızlı priz alması uygulamada sorunlar yaratmaktadır. Bu nedenle granüle yüksek fırın cürüflu çimento kullanımı sıcak havalarda oldukça faydalıdır. Kış aylarında ise hava sıcaklığının düşük olması nedeniyle priz süresi doğal olarak uzamaktadır. Ancak, uygun oranda cüruf içeriği ve priz hızlandırıcı katkılarla bu durumun önüne geçilmektedir (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.5 Hava içeriği**

İlk önce hidrolik ve daha sonra puzolanik reaksiyon sonucu daha fazla C-S-H jeli oluştuğundan beton daha geçirimsiz olmakta ve hava içeriği azalmaktadır. Bu durum genel olarak dayanıklılık açısından olumludur. Ancak, betonda bir miktar hava boşluğunun olması gereken durumlarda(donma-çözünme etkisi gibi) hava sürükleyici katkı kullanılarak betonda kontrollü hava boşlukları sağlanabilmektedir (ACI E3-01).

#### **2.3.3.6 Erken Yaş Basınç Dayanımı**

Granüle yüksek fırın cürüflu çimentoda klinker oranı daha düşük olduğundan ve cürufun etkinleşmesi geç gerçekleştiğinden erken yaş dayanımı bir miktar



düşüktür. Standardlarda erken yaş dayanımı için herhangi bir sınır değeri mevcut değildir. Erken yaş dayanımı özellikle prefabrik üretimlerde ve tünel kalıp gibi inşaatlarda istenen bir özelliktir. Bu durumda priz hızlandırıcı katkıları ve uygun incelikte ve miktarda cüruf içeriği erken yaş dayanımlarının daha yüksek olmasını sağlayabilir. Bilindiği üzere, dayanım tek başına yeterli bir tasarım kriteri değildir. Dayanım kadar önemli bir diğer hususta yapının çevresel etkilere karşı dayanıklı olmasıdır (ACI 233 R-03). Diğer bir deyişle, üstün dayanıklılığın sağlanması esastır. Eğer önce dayanıklılık gözönüne alınarak beton tasarımı yapılırsa dayanım kolaylıkla sağlanır.

#### **2.3.3.7 İleri Yaş Basınç Dayanımı**

Betonda ileri yaş dayanımı olarak standardın öngördüğü 28 günlük değerdir. Ancak, cürufli çimentoların dayanım gelişimi 56, 90 hatta 150 günde daha iyi değerlendirilir. Yapılan laboratuvar çalışmalarında granüle yüksek fırın cürufli çimentoların 28 günde referans betona oranla daha yüksek dayanım verdiği ve bu değerlerin ileri yaşlarda daha da arttığı tespit edilmiştir. Bunun ana nedeni granüle yüksek fırın cürufunun Portland çimentosu ile su arasındaki reaksiyonlar sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile tepkimeye girerek dayanım kazandıran C-S-H jellerini oluşturmasıdır (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.8 Çekme Dayanımı**

Granüle yüksek fırın cürufli çimento az da olsa çekme dayanımını olumlu etkiler. Bu etki basınç dayanımında olduğu gibi ileri yaşlarda daha belirgin biçimde görülmektedir (ACI 233 R-03).

#### **2.3.3.9 Geçirgenlik**

Granüle yüksek fırın cürufli çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan hidrasyon reaksiyonu iki kademe gerçekleşir. Dayanım kazandırma özelliği olan C-S-H jeli oluşumu yüksek miktarda gerçekleşir.  $\text{Ca(OH)}_2$  ve etrenjit miktarı ise daha az olur. Bu sayede daha yoğun, daha küçük ve az boşluklu bir yapı meydana gelir. Bu durum cüruf miktarı arttıkça daha da gelişir (ACI 233 R-03).

### 2.3.3.10 Rötire ve Sünme

Rötire betonda su kaybı ve kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan hacim değışikliği olarak ifade edilir. Plastik, kuruma, termik ve otojen rötire olarak çeşitleri vardır. Bağlayıcı malzemenin yapısı, ince malzeme miktarı, su/bağlayıcı oranı ve hava sıcaklığı rötreyi doğrudan etkiler. GYFC çimentonun, rötire ile ilişkisi net olarak tespit edilememiştir. Ancak %50'den az granüle yüksek fırın cürufllu içeren çimento ile yapılan betonlarda rötrenin değışmediği veya az bir miktar düştüğü bilinmektedir. Sünme, betonun uzun süre sabit bir yük altında deformasyona uğramasıdır. GYFC çimentolu betonda sünme deformasyonu daha düşüktür (Siddique ve Mohammad, 2011).

### 2.3.3.11 Sülfata dayanıklılık

Sülfat etkisi betonarme yapılar için oldukça ciddi sorunlar doğuran çevresel bir etkidir. Sülfat, özellikle deniz suyunda, yeraltı suyunda, atık suda ve toprakta mevcuttur. Bu etkinin olduğu yerlerde yapılacak yapılar sülfat etkisine karşı olacak şekilde tasarlanmalıdır. Yüksek geçirimli betona çeşitli yollarla giren sülfat iyonları çimentoda bulunan  $C_3A$  ve  $Ca(OH)_2$  ile tepkimeye girerek genleşme potansiyeli olan etrenjit oluşumuna neden olur. Granüle yüksek fırın cürufllu çimentoda  $C_3A$  ve  $Ca(OH)_2$  oranı Portland çimentosuna oranla daha düşüktür. Ayrıca GYFC içeren beton daha geçirimsizdir. Bu nedenle sülfat etkisine karşı oldukça dirençlidir (ASTM C 989-99).

### 2.3.3.12 Donatı Korozyonu

Granüle yüksek fırın cürufllu çimentolarla yapılan laboratuvar çalışmalarında cürufun donatı korozyonuna karşı Portland çimentosuyla yapılanlara kıyasla daha dayanıklıdır. Bilindiği üzere granüle yüksek fırın cürufllu çimentoların, betonda donatı korozyonuna neden olan klorür geçirgenliği düşüktür.



### 3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

Beton teknolojisindeki gelişmeler özellikle kimyasal katkı teknolojisinde meydana gelen yeni buluşlardan kaynaklanmaktadır. Kimyasal katkı, betonun ana bileşenleri olan çimento ve agregadan çok daha farklı bir işlevi yerine getirmektedir. Günümüzde kimyasal katkı kullanmaksızın beton üretimi neredeyse yapılmamaktadır. Kimyasal katkılar betonda hem teknik hem de ekonomik avantajlar sağlamaları nedeniyle artık vazgeçilmez hale gelmişlerdir. Birçok ülkede sadece yüksek oranda su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı katkılar kullanılırken diğer normal akışkanlaştırıcı katkıların yerini de orta düzeyde su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı katkılar almaya başlamıştır. Daha yeni bir teknoloji ise Japonya'dan başlayıp Avrupa ülkelerinden sonra bugün ülkemizde de yavaş yavaş kullanılmaya başlamıştır. Kimyasal katkı ile ilgili bu yeni teknoloji çok yüksek oranda su azaltıcı ve hiperakışkanlaştırıcı olarak bilinen kimyasal katkı ile kendiliğinden yerleşen beton yapma teknolojisidir (Sağlık, 2009).

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), herhangi bir vibrasyon gerektirmeden sadece kendi ağırlığı altında döküldüğü kabı doldurabilir. Boşluksuz doldurma yanında ayrışmama da KYB'lerin önemli özellikleridir. KYB'ler taze halde aşağıdaki özellikleri taşımaktadır (Özkul,2013):

- Doldurma Yeteneği: KYB kendi ağırlığı ile hareket edebilen ve bir kalıp içerisine tamamıyla hemen hemen hiçbir boşluk bırakmadan yerleşebilen ve dolabilen betondur. Bu özellik betonun işlenebilirliği ile yakından alakalıdır ve yayılma tablası deneyi ile bu özellik tayin edilir. Beton karışımının akma gerilmesinin düşük olması ve aşırı derecede plastik viskoziteye sahip olmaması gerekir.
- Geçebilme Yeteneği: KYB akan bir karışım değildir, herhangi bir ayrışmaya uğramadan çok dar donatı açıklıklarından geçebilmeli ve aynı zamanda dışarıdan herhangi bir etki olmadan donatıyı sarabilmelidir. Yerleştirme esnasında hiçbir şekilde bloke olmamalıdır ve kendi ağırlığı ile akmalıdır. Bunun olabilmesi için yüksek viskoziteli bir karışım ancak optimum düzeyde tutulmalıdır. Bu özelliğin ölçülmesi de V-Hunisi testi ve L kutusu testi ile yapılır.

- Ayrışma Direnci: KYB yukarıdaki özellikleri taşımanın yanı sıra üniformluluğunu da korumalı ve ayrışmamalıdır. Bunu sağlamak amacıyla karışım içerisinde yeterli miktarda harç olmalı ve bu kısım iri taneleri kaydırıcı ortam yaratarak hareket ettirmelidir. Bu özelliği ölçmek için ise U-Kutusu deney aleti veya Kajima Doldurma kutusu kullanılmalıdır.

Sınırlı iri agrega miktarı, güçlü bir süperakışkanlaştırıcı ile birlikte yüksek akıcılık özelliği gerçekleştirirken, azaltılmış su / ince malzeme oranı ve sınırlı iri agrega miktarı yüksek ayrışma direncini sağlayarak kendiliğinden yerleşen betonu ortaya çıkarmaktadır. En yaygın kullanılan süperakışkanlaştırıcı polimer karboksilat esaslı olanıdır, ancak sülfonatmelamin formaldehit ve naftalin formaldehit benzeri polimerler de kullanılmaktadır. Yukarıda açıklandığı şekilde KYB’de akıcılığı gerçekleştirmek amacı ile kuvvetli bir süperakışkanlaştırıcıya gereksinme vardır. Bu özellik, sadece ilk kuşak süper akışkanlaştırıcılarda olduğu gibi, ince tanelerin üzerine adsorbe olarak aynı işaretli elektrik yükü tanelerin birbirini iterek dağıtması ile sağlanmamakta, bunun yanında dallanmış uzun polimerlerin oluşturduğu hacim doldurma etkisi de gerekmektedir (Özkul vd.,2005).

Ayrıca ayrışmayı önlemeye yönelik olarak ince malzeme ve viskozite düzenleyici bir katkıya da (VDK) gerek duyulur. İnce malzeme olarak uçucu kül, silis dumanı, cüruf ve taş unu kullanılmaktadır. Ultra ince maddelerin çimento hamuru reolojisine etkilerinin incelendiği bir çalışmada çok ince öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, kireç taşı unu ve silis dumanı denenmiştir. Diğer bir çalışmada ise kireç taşı filleri, silis dumanı ve öğütülmüş silis ince malzeme olarak KYB’lere katılarak akış direncine, viskoziteye, çökmeye ve terlemeye etkileri incelenmiştir. Öte yandan ayrışmayı önlemek amacı ile viskozite düzenleyici katılardan da yararlanılabilir.

Kawai (1987) bu katkıları şu şekilde gruplandırmıştır.

1. Nişasta ve doğal sakız benzeri doğal polimerler
2. Ayrıştırılmış nişasta ve türevleri, selüloz eter türevleri, sodyum alginat ve benzeri elektrolitler
3. Polietilen oksit ve polivinilalkol gibi sentetik polimerler

Bu gruba polisakaritler ve akrilik bazlı polimerler de eklenebilir.



KYB'nin ilk kullanım alanı olarak donatıların çok yoğun olduğu ve vibratörlerin ulaşamadığı elemanların üretimi düşünülmekteydi. Daha sonra yüksek perdelerin üretiminde ve betonarme yapıların onarım ve güçlendirme işlerinde KYB kullanılmaya başlandı. Son yıllarda ise KYB'nin yeni bir kullanım alanı olarak prefabrike sektörü öne çıktı (Özkul vd., 2002). Bu son kullanım alanında vibratör gereksinimini ortadan kaldırdığı için gürültünün zararlı etkilerinden korunma olanağıda doğmuştur. Aynı gerekçe, yerleşim bölgelerinde yapılan binaların vibrasyon gürültüsünü azaltma konusunda da geçerlidir. KYB'nin diğer bir yararı işçiliği azaltırken yapım hızını arttırmasıdır. Bir yapıda döşeme ve düşey elemanların üretiminin geleneksel betonla üretimine göre KYB kullanılması durumunda 1/5 oranında daha kısa sürede gerçekleşebileceği belirtilmiştir (Semioli, 2002).

Okamura ve arkadaşları, kuru halde sıkıştırıldıkları betona giren tüm malzemelerin %50'sinin iri agregadan oluşmasını önermişlerdir. 5 mm'den küçük boyutlu agregalar ile toz malzemelerden oluşturulan harç fazında %50 oranında ince agrega kullanmışlardır. Su/toz oranı ve süperakışkanlaştırıcı miktarı istenilen yayılmayı sağlayacak şekilde ayarlanmıştır (Okamura ve Ouchi, 1998).

### **3.1. Kendiliğinden Yerleşen Beton Sınıfları**

- Toz Tip KYB: Beton karışımına yeterli derecede ayrışma direncini kazandırma ve yüksek deforme kabiliyeti verme amacıyla su/toz oranının azaltılmasıyla hazırlanır ve hava sürükleyici katkıları kullanılabilir.
- Viskozite Tip KYB: Beton karışımına özellikle ayrışmayı önleyici ve yüksek deforme olabilme kabiliyeti verebilecek bir viskozite modifiye edici madde ile aynı anda hiperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkının birlikte kullanılması ile elde edilen karışımlardır.
- Kombinasyon Tip KYB: Toz tip KYB için tasarlanır ve bir viskozite modifiye edici madde ile taze beton üretimi esnasında rutubet alma hatalarını ve agrega tane dağılımındaki oynamaları kompanse etmek ve kalite sapmalarını önlemek amacıyla yapılan betondur. Kalite Kontrolüne yardımcı olur (Sağlık, 2009).

### 3.2. Kendiliğinden Yerleşen Taze Beton Üzerinde Yapılan Deneyler

KYB'lerin taze beton özelliklerini belirlemede kullanılan deney yöntemleri ve deneylerin belirlediği KYB'lerin karakteristik özellikleri aşağıdaki gibidir. (EFNARC,2002)

**Tablo 3.1:** KYB'lerin karakteristik özellikleri

| Özellik                      | Test Metodu         | Ölçülen Değer                 |
|------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| Akıcılık / Doldurma Yeteneği | Çökme-Akma          | Yayılma Ortalaması            |
| Viskozite / Akıcılık         | T 500 / V hunisi    | Akma Zamanı                   |
| Geçme Yeteneği               | L Kutusu / U Kutusu | Geçme Oranı / Yükseklik Farkı |

KYB'nin taze haldeki doldurma yeteneği ve kararlılığı (stabilitesi) dört temel özellik ile tanımlanır. Taze haldeki KYB'nin akıcılık / doldurma yeteneği, viskozite / akıcılık özelliği, geçme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç gibi özellikleri sağlaması gerekmektedir.

Bu özelliklerin sınıflandırma sistemi ise aşağıdaki gibidir.

**Tablo 3.2:** KYB'lerin sınıflandırma sistemleri

| Özellik         | Tanım   | Sınıflandırma |
|-----------------|---------|---------------|
| Akıcılık        | SF      | 3 sınıf       |
| Viskozite       | VS / VF | 2 sınıf       |
| Geçme Yeteneği  | PA      | 2 sınıf       |
| Ayrışma Direnci | SR      | 2 sınıf       |

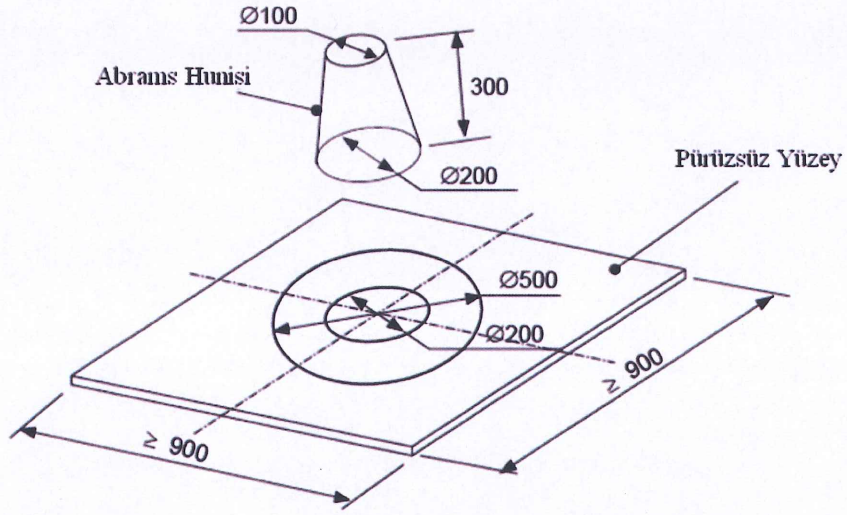
#### 3.2.1. Çökme-Yayılma Deneyi

Klasik çökme hunusi kullanılabileceği gibi Alman Standardı DIN 1048'de yer alan çökme konisinde kullanılabilir. Bazen koni ters konumda, yani geniş ağzı üstte kalacak şekilde de yerleştirilebilir. 50 cm çapında çizilen bir dairenin merkezine yerleştirilen koni beton ile doldurulduktan sonra yukarıya doğru çekilerek çıkartılır ve ölçümler yapılabilir.





Şekil 3.1: Çökme yayılma deneyinin yapılışı ve sonucu



Şekil 3.2: Çökme yayılma deneyinin şematik gösterimi

- 50 cm çaplı daireye ulaşıncaya kadar geçen süre ölçülür. Bu değer betonun başlangıçtaki akış hızını verir ve belirli değerlerden küçük olması istenir.
- Toplam yayılma süresi belirlenebilir.
- Yayılma sona erdikten sonra oluşan dairenin birbirine dik iki çapı ölçülerek çökme-yayılma değeri bulunur.

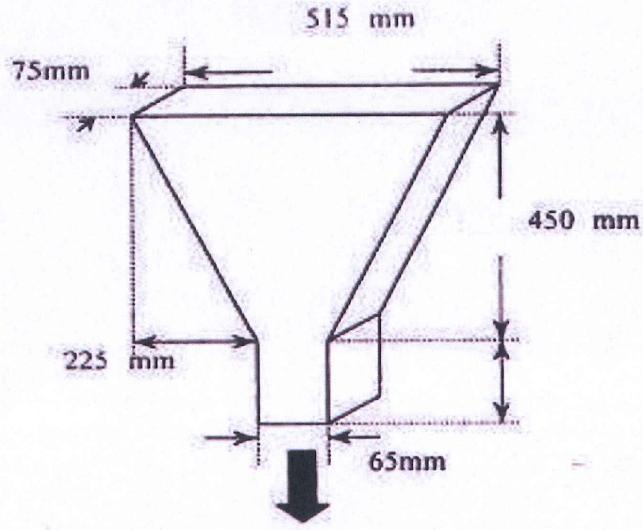
### 3.2.2. V-Hunisi Akış Testi

Bu deney betonun dar bir aralıktan geçiş yeteneğini ve vizkozitesini dolaylı olarak ölçmeye yöneliktir. Huni taze beton ile doldurulduktan sonra alt uçtaki kapak açılarak akış başlatılır. Üstten bakıldığında alttan ışık geçmeye başladığı ana kadar geçen süre ölçülür. (Şekil 3.3 ve Şekil 3.4)





Şekil 3.3: V Hunisi deneyi aşamaları



Şekil 3.4: V Hunisi deneyinin şematik gösterimi

### 3.2.3. Çift Kutu (U Kutusu) Testi

U borusu şeklinde iki kutu yan yana yerleştirilir ve aralarında alttan 19 cm'lik bölüm açık olacak şekilde ayarlanır. Bu açıklığı 10 mm çaplı 5 adet çelik çubuk aralarında 35 mm aralık kalacak şekilde düşey konumda yerleştirilir. Beton doldurulmadan önce bu açıklık hareket edebilen bir kapak ile kapatılır. A odası belirli bir yüksekliğe kadar doldurulur. Burada hem engellerden (çubuklar) geçme yeteneği hem de doldurma yeteneği ölçülmektedir. Deney sırasında iki ölçüm yapılır; hem doldurma işlemi bitene kadar geçen süre ölçülür, hem de ikinci kabinde betonun yükselme değeri kaydedilir. İki yükseklik arasındaki fark alınır. Çift (U kutusu) deneyi Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

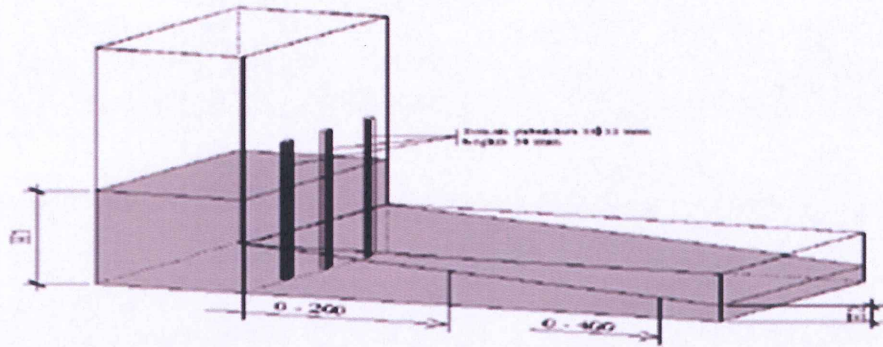




Şekil 3.5: Çift kutu testi aşamaları

### 3.2.4. L Şeklinde Kutu Testi

Bu alet kare kesitli kutu şeklinde bir bölüm ile bunun önünde yer alan bir yatay platformdan oluşmaktadır. Kutunun alt kısmında bulunan açıklığa 12 mm çaplı ve 34 mm aralıklı 3 adet donatı yerleştirilmiştir. Başlangıçta açıklık kapatılmıştır. Kutu taze beton ile doldurulduktan sonra kapak yukarıya çekilir ve beton donatılar arasından geçerek platform üzerinde akmaya başlar. 200 mm ve 400 mm'lik uzaklıklara ulaşma süreleri ayrı ayrı ölçülür. Ayrıca betonun kutu içinde kalan bölümünün  $h_1$  ve en uçtaki bölümünün  $h_2$  yükseklikleri ölçülür ve oranlanır. Bu deney betonun doldurma yeteneği, engel geçiş yeteneği ve ayrışma direnci gibi özelliklerini ölçmeye yarar. Şekil 3.6'da deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.6: L kutusu deneyi şematik gösterimi

### 3.2.5. Viskozimetre

Çimento hamuru ve harcında reolojik özellikler eş eksenli silindirden oluşan yardımıyla ölçülebilir. Beton ve bazen harç için ise bir paletin beton içinde gömüldüğü ve belirli hızlarla dönen betonun palete uyguladığı dönme momentinin ölçümüne dayanan aletler kullanılmaktadır. Beton için ilk viskozimetre Tattersal

tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra bu alet modifiye edilerek BML viskozimetresi ve IBB Beton Reometresi adı altında modellenmiştir.

KYB için uygun test metodları ve kabul edilebilir limit değerleri Tablo 3.3'de gösterilmiştir.

**Tablo 3.3:** EFNARC Komitesi tarafından tavsiye edilen kendiliğinden yerleşebilirlik deneyleri sınır değerleri

| Özellikler                   | Deney Adı    | Birim         | Değer Aralığı |
|------------------------------|--------------|---------------|---------------|
| Akıcılık / Doldurma Yeteneği | Çökme-Yayıma | mm            | 650-800       |
| Viskozite / Akıcılık         | T 500 süresi | s             | 2-5           |
|                              | V hunisi     | s             | 6-12          |
| Geçme Yeteneği               | L kutusu     | h2/h1         | 0,8-1,0       |
|                              | U kutusu     | h2-h1<br>(mm) | 0-30          |

### 3.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları

1. Taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacak, böylece vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve ekonomik kayıplar ortadan kalkacaktır. Vibratör kullanımının çevreye yaydığı gürültü kirliliği (özellikle prefabrike beton sektörü için) önlenecektir. Prefabrike beton sektöründe vibratör kullanımının kalıplara verdiği zarar ortadan kalkacağından kalıpların ekonomik ömürleri artacaktır.(Pielkenrood, 2002) İnsan sağlığı açısından 80 dB üstünde ses; dalgınlık, stres ve yorgunluk gibi rahatsızlıklara sebep olmaktadır.  $0,25 \text{ m/sn}^2$ 'nin üzerindeki vibrasyon ivmesi kan dolaşımını bozmaktadır. Özellikle, kuvarz tozu kanserojen etkisi olduğu için  $5 \text{ mg/m}^3$ 'ün üzerindeki konsantrasyonları insan sağlığını tehdit etmektedir. Bunun gibi sağlık sorunlarının ortadan kaldırılmasının işçilikte % 5 tasarruf sağlayacağı öngörülmektedir (Walraven, 2002).

KYB malzeme maliyeti açısından geleneksel betonla karşılaştırıldığında, farklı araştırmacılar farklı sonuçlar elde etmiştir. Değişik ülkeler için maliyet farklılıkları



doğaldır. Fakat genel kanı salt malzeme açısından karşılaştırma yapıldığında KYB'nin daha yüksek maliyetli olacağıdır. ABD'de 2002 yılında ENR firmasının prefabrike beton üretiminde kullandığı 69 cm yayılma çapına sahip KYB ve 15 - 20 cm çökme değerine sahip geleneksel beton (GB) dizayn maliyetleri irdelenmiş ve KYB ile GB arasında 5 \$/m<sup>3</sup> lük bir fark olduğu görülmüştür. Öte yandan işçilik açısından yapılan değerlendirmelerde % 32'lik bir maliyet azalması elde edildiği rapor edilmiştir.

Arjantin'de yapılan bir araştırmada hazır beton üretiminde KYB kullanımının malzeme maliyetlerini % 25 arttırdığı, öte yandan işçilik maliyetini % 75 azalttığı ve inşaat hızını % 25 arttırdığı tespit edilmiştir (Daczko, 2002).

2. Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını arttıracaktır. Özellikle, deprem riski olan bölgelerde perde tipi kolon kullanımının yoğun olması ve bu elemanların sık donatılı olmaları vibratör kullanımını zorlaştırmaktadır. Betonarme yapılarda önemli problemlerden biri de donatı yoğunlaşmasının meydana geldiği düğüm noktalarında ve perde tipi elemanlarda betonun iyi sıkıştırılamamasıdır (Şekil 3.7 ve Şekil 3.8.). Bu sorunlar KYB kullanımıyla çözülebilir. (Şekil 3.9)

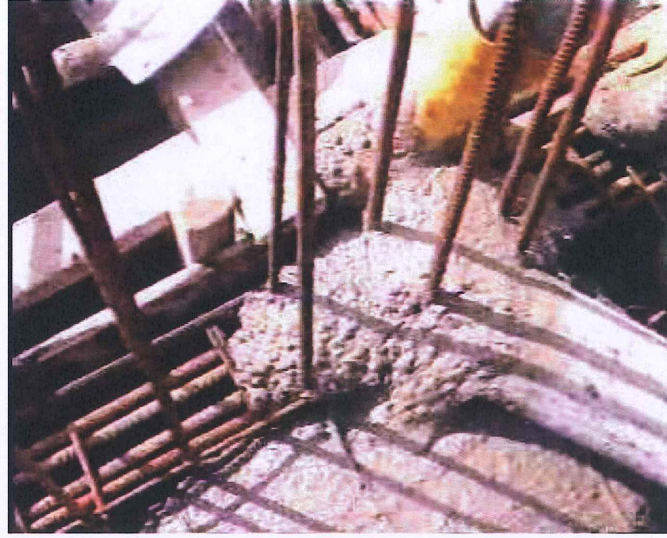


Şekil 3.7: Düğüm noktasında sıkıştırma yetersizliği





**Şekil 3.8:** Kolon alt ucunda sıkıştırma yetersizliği



**Şekil 3.9:** Sık donatılı bölgeden kendiliğinden yerleşen betonun geçişi  
(Felekoğlu, 2003)

3. Yeni nesil kimyasal katkıların kullanımıyla çok akıcı, fakat düşük su/çimento oranına sahip, yüksek mukavemetli beton üretilerek beton kalitesi hem dayanım hem de dayanıklılık açısından arttırılmaktadır.



4. Efektif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla, prefabrike sektöründe erken kalıp alma için, özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabilir (Corradi, Khurana, Magarotto ve Torresan, 2002). Bu tür KYB'lerin erken dayanımı yüksek olacağından, kalıp alma hızları artmakta dolayısı ile inşaat hızında artışlar meydana gelmektedir. Prefabrike beton sektöründe erken kalıp alma sırasında meydana gelen üretim kayıpları (kalıp alma sırasında yeterli dayanıma sahip olmadığından çatlama, kırılma ile elden çıkma) geleneksel üretim yöntemlerinde % 15 - 20'lere ulaşırken, KYB kullanımıyla bu kayıpların % 5'e kadar düşürülebildiği rapor edilmiştir (Dowson, 2002).

KYB'nin prefabrike beton üretiminde kullanıldığı bir fabrikada standart panel elemanın dökümü 3 - 4 dakika sürerken, aynı elemanın geleneksel yöntemler kullanılarak yerleştirme işlemi 10 - 14 dakikayı ve perdahlama ile beraber toplam döküm süresi 30 dakikayı bulmaktadır. Fakat fabrikanın bu hızı yakalaması için KYB üretim ve yerleştirme yönteminin kavranıp sistematik hale gelmesi ve işçilerin tecrübe kazanması belli bir süre almıştır (Hughes, 2002).

Prefabrike beton üretiminde kalıbın maruz kalacağı dinamik yükler ortadan kalkacağından, manyetik bağlayıcılarla tutturulan kalıplar kullanılabilir. Kalıp ömrü de vibrasyonun kalkmasıyla önemli oranda artacaktır. Kalıp söküm ve yeniden kurulum işlemlerinde de zamandan % 50 tasarruf edildiği belirlenmiştir (Walraven, 2002).

KYB'nin inşaat hızını artırıcı etkisi için iki farklı örnek verilebilir: Birincisi 1983 ve 1984 yıllarında Hong-Kong'da büyük çaplı bir temel kirişi kütle betonu dökümünde KYB kullanımınıdır. Vibrasyon işleminin ortadan kaldırılmasıyla, 190 m<sup>3</sup>/saat ortalama döküm hızıyla çalışılmış ve 350 m<sup>3</sup>/saat hızına kadar çıkılmıştır (Colllepard, 2001).

İkinci örnekte İsveç'te köprüler üzerine yapılan bir araştırmadır. Araştırma sonuçlarına göre köprülerin KYB ile yapılması, inşaat süresini geleneksel yöntemlere göre % 5 ile 15 arasında kısaltmıştır.

5. KYB karışım oranları ve bileşenleri değiştirilerek farklı reolojik karakteristiklerde üretilebilir. Bazı araştırmacılar KYB'nin tiksotropik davranışından ötürü yerleştirme sonrası kalıp basıncının azaldığını savunmaktadır. Fakat ilk anda

KYB hidrostatik basınç etkisi yaratmaktadır. Tikotropik davranış, sabit bir deformasyon hızında, taze betonun kayma direncinde zamanla meydana gelen azalma olarak açıklanabilir. Deformasyon hızı sıfıra indirilirse yani karıştırma işlemi durdurulursa, hareketsiz halde iç sürtünme ve kohezyonla taze beton kayma direncini yeniden kazanır.

Bernabeu'nun (2000) hazırladığı düzenekle yaptığı kalıp içi hidrostatik basınç ölçümleri, KYB'de ilk anda hidrostatik basınç etkisinin dikkate alınması gerektiği ortaya koymaktadır. Şekil 2.13'de bir panel elemanın farklı noktalarında basınç ölçümlerinin zamanla değişimi görülmektedir. Döküm tamamlandığında kalıp basıncı en üst seviyede iken zamanla basınç azalmaktadır. Kalıpların bu maksimum basınca direnecek dayanımda hazırlanması gerekmektedir. KYB için döküm hızı kalıp basıncını etkileyen önemli bir parametredir. Döküm hızı azaltılırsa tiksotropiden kaynaklanan kalıp içi basınç düşüşünden yararlanılabilir (Osterberg, 2002). kalıp basıncının düşmesini sağlayan ilk sebep tiksotropi, ikincisi ise yaklaşık 6 saat sonra başlayan hidratasyon sertleşmesidir (Khayat ve Morin, 2002).

Prefabrike beton üretiminde sıkıştırma işleminde genellikle dış vibrasyon uygulandığı için kalıp et kalınlıkları dinamik etkilere göre boyutlandırılmaktadır. Bu sebeple kalıplar oldukça ağırdır. KYB kullanılması halinde dinamik etki ortadan kalkacağından daha ince et kalınlıklı kalıp kullanılabilir. Kalıplar hafifleyeceğinden taşıma ve bakım işleri kolaylaşır.

7. KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldıracaktır. Fakat bu durum aynı zamanda bir dezavantaja dönüşebilir; sıva yapılması gerekiyorsa pürüzsüz yüzeyi sebebiyle KYB sıva tutmayabilir. Öte yandan durabilite, özellikle donatı korozyonu açısından hayati önem taşıyan paspayı tabakası kalitesi de KYB kullanılarak artırılabilir. KYB dizaynında genellikle yüksek oranda toz madde kullanılması, kısıtlanmış iri agrega maksimum tane boyutu ve miktarı, kalıp yüzeylerinde sıkışık hava boşluğu kalma riskini azaltmaktadır. Düşük su/bağlayıcı oranı sebebiyle kapiler boşluklarda da azalma beklenebilir.

8. Prefabrike beton sektöründe karşılaşılan önemli sorunlardan biri de sık donatılı narin elemanların kalıptan alınırken ince kesitlerinde yetersiz vibrasyondan kaynaklanan boşlukların ortaya çıkmasıdır. Bu durumda yama ile boşluklar



kapatılmaktadır. KYB kullanımı ile rötuş işleminin % 25 ile % 75 oranında azaldığı belirlenmiştir (Martin, 2002).

9. KYB pompalanabilirlik açısından geleneksel betona göre daha avantajlıdır. Pompa içi basıncın geleneksel betona kıyasla ortalama % 20 azaldığı rapor edilmiştir. Bu durum taze KYB'nin tiksotropik yapısından kaynaklanmaktadır (Fornasier ve Zitzer, 2002).

### 3.4. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları

KYB'nin yukarıda bahsedilen avantajlarının yanında bazı dezavantajları da mevcuttur. Fakat bunların çoğu, zamanla yapılan araştırma geliştirme çalışmalarıyla ortadan kaldırılabilir özelliktedir;

1. KYB malzeme maliyeti açısından normal betona kıyasla daha pahalıdır. Maliyeti arttırıcı ana etken efektif kimyasal katkıları olup, gelecekte bu katkıların maliyetlerinin düşmesi beklenmektedir. Fakat daha önceden de bahsedildiği gibi sadece malzeme maliyet açısından karşılaştırma yapmak hatalı olacaktır.

2. KYB'nin performansı malzeme tipinin ve oranlarının değişiminden etkilenir. Klasik betona göre daha sıkı kontrol gerektirir. Bu da üreticiye ilave tedbirler alma zorunluluğu getirir. Üretim sırasında müdahale zorluğu vardır. Örneğin agrega nem durumuna göre karışıma su ilavesi yapılması gerekebilir.

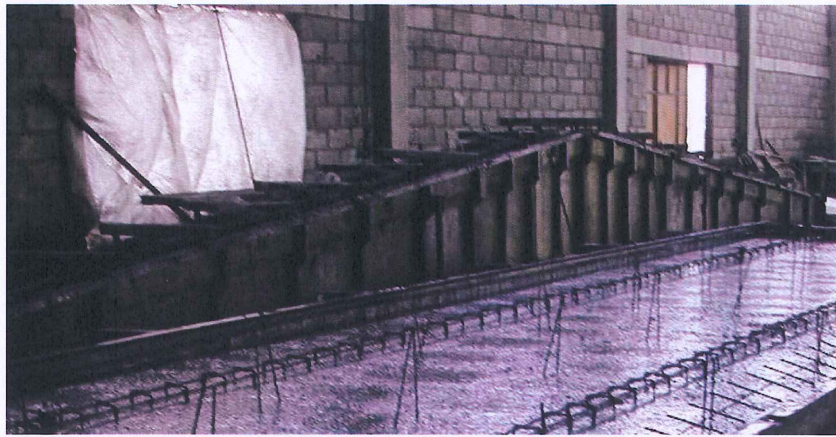
3. Kesinleşmiş dizayn yöntemi ve standart deneylerinin yokluğu kalite kontrol işlerinde genelleme yapılmasını engellemekte ve standartlaştırmada sıkıntılara yol açmaktadır. Özel şartnameler oluşturularak başarılı uygulamalar gerçekleştirilmesine karşın uluslararası genelleme yapmak pratikte mümkün değildir. Çünkü yerel malzemelerdeki değişkenlikler KYB'nin taze haldeki reolojisini etkilemektedir.

4. Geleneksel betona göre yüksek oranda toz malzeme içerdiği için, boyutsal stabilitesi hakkında toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar elde eden araştırmacılar çoğunluktadır. Dizayn yöntemi ve kullanılan malzemelere göre değişmesine rağmen, genellikle kuruma büzülmesinin KYB'de geleneksel betona kıyasla daha yüksek olduğu kabul edilmektedir. Bu durum öngörülmesi gereken eleman üretiminde dikkate alınmalıdır (Bury ve Christensen, 2002).

5. KYB'nin erken dönemde küre hassas olduğu çeşitli araştırmacılarca ortaya konulmuştur (Dehn, 2002). Küre hassasiyet puzolanik aktivite gösteren toz maddelerin kullanılması halinde daha baskındır. KYB'nin en azından 7 güne kadar kür edilmesi tavsiye edilmektedir. Kür edilmemesi halinde sıcak havalarda plastik büzülme çatlakları meydana gelebilir (Turcry, Loukili ve Haidar, 2002).

6. Özellikle prefabrike beton üretiminde taze betonun taşınması için geleneksel betonda kullanılan bazı sistemlerin değiştirilmesi veya modifiye edilmesi gerekmektedir. Klasik prefabrike beton üretiminde kuru kıvamlı taze beton (2 – 5 cm çökme değeri) yerleştirileceği alana hareketli bantlarla ya da kovalar yardımıyla taşınmaktadır. KYB kullanılması halinde taşıyıcı bantların kullanımı mümkün değildir. Taşıma kovalarının da kapak kısımları sızdırmaz hale getirilmelidir. Aksi takdirde KYB'nin hamur kısmı taşıma sırasında sarsıntıyla açıklıktan sızarak ayrışacaktır. Viskozitesi yüksek KYB'lerde sızma söz konusu olmayacağından kovada değişikliğe gerek yoktur (Bury ve Bühler, 2002). KYB'nin pompalanması halinde daha iyi kalıp yüzeyi elde edildiği, kovayla taşınması halinde ise hem döküm süresinin uzadığı hem de soğuk derz olduğu gözlenmiştir (Dehn, 2002).

7. Prefabrike beton üretiminde mevcut kalıp sistemlerinin bir kısmı KYB kullanımına uygun değildir. Kalıp sistemlerinin KYB kullanımına göre modifiye edilmesi gereklidir (Şekil 3.10). % 2'den fazla eğimli elemanlar KYB ile dökülemez (Tviksta, 2000)



**Şekil 3.10:** KYB kullanımının kalıp sistemini değiştireceği eğimli prefabrike elemanlar



8. Geleneksel beton üretiminde ahşap kalıp sıklıkla kullanılmaktadır. Ahşap kalıpların çakılması sırasında iki lata arasında boşluk bırakılması halinde KYB kullanıldığında hamur sızması olabilir bu nedenle kalıp işçiliğine özen gösterilmelidir. Ayrıca merdivenlerde kalıp sistemi nedeniyle KYB kullanılamamaktadır.

9. KYB tiksotropik yapısı gereği, belli bir süre karıştırılırsa akıcılığı artar başka bir deyişle viskozitesi düşer. Viskozitesinin kararlı bir konuma gelmesi için gereken karıştırma süresi normal betona kıyasla daha fazladır. Bu özellik zaman ve enerji kaybına yol açacaktır. Fakat bu kayıp yerleştirme işlemindeki kolaylıklar dikkate alındığında ihmal edilebilecek kadar azdır.

10. KYB'nin yerleştirilmesinde sürekli döküm yöntemleri tercih edilmelidir (Osterberg, 2002). Yerleştirmenin kesikli yapılması halinde, iki karışım arasında derz oluşma riski vardır. İki farklı karışımın yerleştirme süreleri arasında 5 ila 30 dakikalık fark olması halinde, iki betonun birbirine kaynaşması için ara bölgede kısa süreli vibrasyona ihtiyaç duyulduğu rapor edilmiştir (Khayat ve Morin, 2002). Bu işlemin yapılmaması halinde, iki döküm arasında soğuk derz oluştuğu ve zayıf bir geçiş bölgesi meydana geldiği tespit edilmiştir. Benzer sorun kendiliğinden yerleşen tamir harçlarının eski betona aderansı konusunda da yaşanmıştır (Courard, Darimont, Willem, Geers ve Degeimbre, 2002).

## **4. DENEYSEL ÇALIŞMA**

### **4.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler**

#### **4.1.1. Çimento**

Çalışmada Akçansa Çimento Fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimentosu kullanılmıştır. Çimento'ya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

#### **4.1.2. Mineral Katkılar**

Çalışmada Orhaneli Termik Santralinden temin edilen TS EN 197-1'e göre sınıflandırılmış V sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Silis dumanı Antalya ETİ Elektrometalurji A.Ş'den temin edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu ise Karçimsa A.Ş.'den temin edilmiştir. Uçucu kül, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

#### **4.1.3. Kimyasal Katkı**

Çalışma kapsamında, BASF firmasından temin edilen polikarboksilik eter esaslı TS EN 934-2 standardına uygun, hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır.

#### **4.1.4. Agregası**

Bu çalışmada, agregası olarak 0/5 ve 5/12 mm tane boyutlarında kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 4.2'de, elek analizi sonuçları ise Tablo 4.3'de verilmiştir. Agregaların betonda kullanım oranı, agregası karışımının granülometrisinin, TS 802 standardında verilen incelik ve kabalık sınırlarının içinde kalacak ve ideal granülometri eğrisine mümkün olduğunca yakın olacak şekilde belirlenmiştir. Agregaların ağırlıkça betonda kullanım oranı 0/5 ve 5/12 mm tane sınıflarındaki agregalar için sırasıyla, % 52 ve % 48'dir. Agregası karışımının granülometri eğrisi, incelik, kalınlık ve ideal granülometri eğrileri ile birlikte Şekil 4.1'de verilmiştir.



**Tablo 4.1:** Bağlayıcı malzemelerin özellikleri

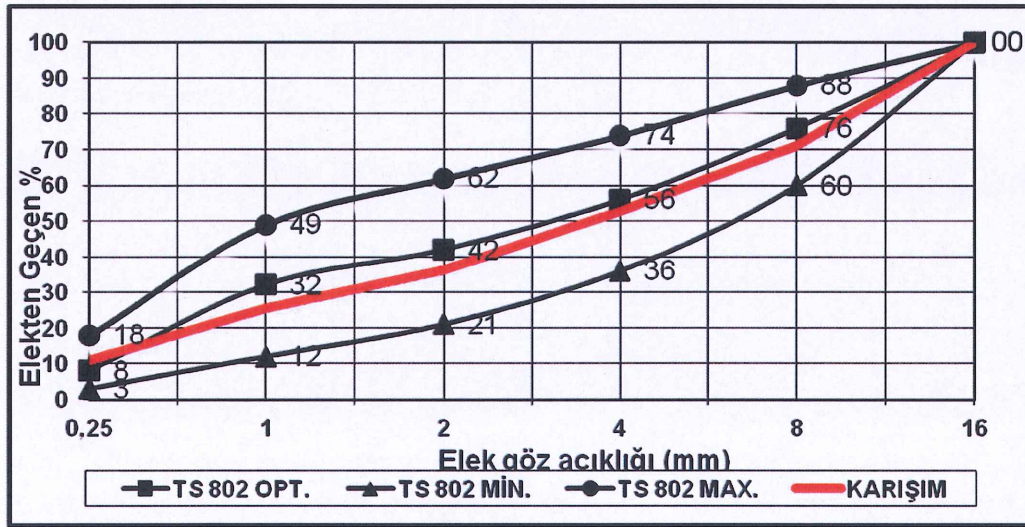
| BİLEŞEN                            | CEM I 42.5 R | UÇUCU KÜL | SİLİS DUMANI | GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU |
|------------------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------------------------|
| MgO (%)                            | 1,90         | 2,28      | 3,93         | 3,40                        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 4,35         | 24,61     | 0,56         | 14,48                       |
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 20,05        | 48,53     | 86,20        | 41,80                       |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 2,80         | 2,48      | 0,13         | 0,62                        |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0,34         | 0,35      | 0,88         | 0,34                        |
| K <sub>2</sub> O (%)               | 0,79         | 2,51      | 2,14         | 1,03                        |
| CaO (%)                            | 63,32        | 9,48      | 2,17         | 34,51                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 3,4          | 7,59      | 0,46         | 1,41                        |
| Serbest CaO (%)                    | 1,29         | 0,11      | -            | -                           |
| Çözünmeyen Kalıntı (%)             | 0,32         | -         | -            | -                           |
| Kızdırma Kaybı (%)                 | 3,72         | 1,69      | 3,38         | 0,08                        |
| Ölçülemeyen (%)                    | 0,64         | -         | -            | -                           |
| Kireç Doygunluk Faktörü            | 97,72        | -         | -            | -                           |
| C <sub>3</sub> S (%)               | 58,03        | -         | -            | -                           |
| C <sub>2</sub> S (%)               | 13,70        | -         | -            | -                           |
| C <sub>3</sub> A (%)               | 5,77         | -         | -            | -                           |
| C <sub>4</sub> AF (%)              | 10,35        | -         | -            | -                           |
| Priz Başlangıcı (dk)               | 190          | -         | -            | -                           |
| Priz Sonu (dk)                     | 245          | -         | -            | -                           |
| Su (%)                             | 28,6         | -         | -            | -                           |
| Özgül Ağırlık                      | 3,11         | 2,14      | 1,98         | 2,89                        |
| Genleşme (mm)                      | 0,5          | -         | -            | -                           |
| Blaine (cm <sup>2</sup> /g)        | 3695         | 4400      | ~150000      | 5650                        |
| 45 mikron bakiye (%)               | 2,2          | -         | -            | -                           |
| 90 mikron bakiye (%)               | 0,1          | -         | -            | -                           |
| 2 gün (MPa)                        | 31,7         | -         | -            | -                           |
| 28 gün (MPa)                       | 57,1         | -         | -            | -                           |
| Reaktif CaO (%)                    | -            | 7,58      | -            | -                           |
| Reaktif SiO <sub>2</sub> (%)       | -            | 34,06     | -            | -                           |
| Puzolanik aktivite (%) (28. gün)   | -            | 81,1      | 98,4         | 90,2                        |

**Tablo 4.2:** Agregaların fiziksel özellikleri

| Fiziksel Özellikler                                    |         | Agrega tane sınıfı |         |
|--|---------|--------------------|---------|
|  |         | 0/5 mm             | 5/12 mm |
| Özgül ağırlık (kuru) (g/cm <sup>3</sup> )              |         | 2,58               | 2,59    |
| Özgül ağırlık (kuru yüzey doygun) (g/cm <sup>3</sup> ) |         | 2,63               | 2,67    |
| Su emme (%)  |         | 1,8                | 1,11    |
| Birim ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )                     | Sıkışık | 1,670              | 1,630   |
|  | Gevşek  | 1,485              | 1,465   |

Tablo 4.3: Elek analizi

|                        |      | Elekten Geçen (%) |      |     |     |    |    |     |      |    |
|------------------------|------|-------------------|------|-----|-----|----|----|-----|------|----|
| Elek Göz Açıklığı (mm) |      | 16                | 11,2 | 8   | 4   | 2  | 1  | 0,5 | 0,25 |    |
| Tane sınıfı            | 0/5  | %52               | 100  | 100 | 100 | 97 | 70 | 49  | 34   | 21 |
| Tane Sınıfı            | 5/12 | %48               | 100  | 97  | 40  | 5  | 0  | 0   | 0    | 0  |



Şekil 4.1: KYB üretiminde kullanılan granülometri eğrisi

#### 4.2. Deney Yöntemi

Tüm karışımlar sıcaklık kontrollü odada  $20 \pm 1$  °C'de gerçekleştirilmiştir. Katkı, su ve çimento'nun sıcaklığının ortam sıcaklığında olması için, bu malzemeler sürekli olarak deneyin gerçekleştirildiği odada bekletilmiştir. Karışımlarda taze halde Çökme-Yayıma, V kutusu, U kutusu, L kutusu, hava içeriği; sertleşmiş halde ise basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve basınçlı su geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır.

Deneyssel çalışmada C30/37 ve C80/95 olmak üzere biri normal sınıfta diğeri yüksek dayanım sınıfında 2 tip KYB üretilmiştir. C30/37 için toplam bağlayıcı miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$ , C80/95 için ise  $600 \text{ kg/m}^3$  olarak seçilmiştir. Çimento ile yer değiştirilerek (ağırlıkça) elde edilen mineral katkı karışım ucuğu kül ile granüle yüksek fırın cürufu için % 10, % 30 ve % 50 oranlarında, silis dumanı için ise % 10



ve % 20 oranındadır. Deneysel çalışmada kullanılan bağlayıcı malzeme oranları Tablo 4.4’de verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Deneysel çalışmada kullanılan bağlayıcı malzeme oranları

| BETON SINIFI | MİNERAL KATKI İKAME ORANI (%) | ÇİMENTO (kg/m <sup>3</sup> ) | UÇUCU KÜL (kg/m <sup>3</sup> ) | GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU (kg/m <sup>3</sup> ) | SİLİS DUMANI (kg/m <sup>3</sup> ) | TOPLAM BAĞLAYICI MİKTARI (kg/m <sup>3</sup> ) | DENEY SABİTLERİ   |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--|-----------------------------------|---|---|
| C30/37       | 0                             | 500                          | 0                              | 0  | 0                                 | 500   | *AGREGA TİPİ<br>*AKIŞKANLAŞTIRICI KATKI TİPİ<br>*ÇİMENTO TİPİ |
|              | 10                            | 450                          | 50                             | 0  | 0                                 | 500   |   |
|              | 30                            | 350                          | 150                            | 0  | 0                                 |   |   |
|              | 50                            | 250                          | 250                            | 0  | 0                                 |   |   |
|              | 10                            | 450                          | 0                              | 50   | 0                                 | 500   |   |
|              | 30                            | 350                          | 0                              | 150  | 0                                 |   |   |
|              | 50                            | 250                          | 0                              | 250  | 0                                 |   |   |
|              | 10                            | 450                          | 0                              | 0  | 50                                | 500   |   |
| 20           | 400                           | 0                            | 0                              | 100  |                                   |   |   |
| C80/95       | 0                             | 600                          | 0                              | 0  | 0                                 | 600   |   |
|              | 10                            | 540                          | 60                             | 0  | 0                                 | 600   |   |
|              | 30                            | 420                          | 180                            | 0  | 0                                 |   |   |
|              | 50                            | 300                          | 300                            | 0  | 0                                 |   |   |
|              | 10                            | 540                          | 0                              | 60   | 0                                 | 600   |   |
|              | 30                            | 420                          | 0                              | 180  | 0                                 |   |   |
|              | 50                            | 300                          | 0                              | 300  | 0                                 |   |   |
|              | 10                            | 540                          | 0                              | 0  | 60                                | 600   |   |
| 20           | 480                           | 0                            | 0                              | 120  |                                   |   |   |

Tüm karışımlarda başlangıç çökme-yayılma değeri 700±20 mm olarak hedeflenmiş ve bu hedefin gerçekleşmesi durumunda diğer deneyler yapılmıştır. Çimento+mineral katkı ağırlığının %1-2’si arasında değişen miktarlarda hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılarak bu hedef yakalanmaya çalışılmıştır. C30/37 sınıfı beton için su/bağlayıcı oranı 0,50; C80/95 sınıfı için ise 0,30 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Karışım gradasyonu Şekil 4.1’de görüldüğü gibi kullanılmakla birlikte, su/bağlayıcı oranı sabit tutulduğu için katkı dozajının değiştirilmesi durumunda dahi ayrışmanın önüne geçilemediği durumlarda 0/5 ve 5/12 oranlarında değişiklikler yapılmıştır. Bunlar, sonuç tablosunun ilgili yerlerinde “\*” not olarak belirtilmiştir.

Uçucu kül, granülü yüksek fırın cürufu ve silis dumanı için TS EN 206-1 standardında farklı etkinlik katsayıları verilmiştir. Su/bağlayıcı oranı sabit tutulduğundan dolayı bu malzemelerin etkinlik katsayılarına bağlı olarak 1 m<sup>3</sup> beton

içerisine giren su miktarı değişecektir. Taze beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyecek olan bu durumun önüne geçmek için tüm karışımlarda mineral katkıların etkinlikleri “k=1” olarak dikkate alınmış ve aynı su miktarı kullanılmıştır.

Beton örnekleri, 100 dm<sup>3</sup> kapasiteli laboratuvar tipi dikey eksenli beton mikseri kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle agregalar mikser içinde kuru olarak karıştırılmış, daha sonra çimento ve mineral katkıları ilave edilerek bir süre daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra, katkıyla karıştırılmış olan su, miksera ilave edilerek yaklaşık olarak 2 dakika süreyle karıştırma işlemi yapılmıştır. Kalıplara vibrasyon ya da herhangi bir şişleme işlemi yapılmamıştır. Hedef çökme değerini yakalamış olan karışımların 28. ve 56. günlerdeki basınç dayanımını belirlemek üzere 150 mm ayrıtlı 3'er adet küp alınmıştır. Ayrıca 28. günde yarıda çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla 3, yine basınçlı su geçirimsizliği için de 3 adet 150 mm ayrıtlı numune alınmıştır. Örnekler kırım gününe kadar 20 °C sıcaklığındaki kür havuzlarında bekletilmiştir.



## 5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

### 5.1. Taze Beton Deneyleri

Tüm deney sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

#### 5.1.1. Çökme-Yayılma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

%10 uçucu kül içeren C30 betonunda %1,2 katkı oranı hedeflenen yayılma için yeterli gelmediğinden katkı oranı %1,5 oranına çıkarılmıştır. Ancak, bu oran hedeflenen yayılma değerini aştığı için katkı dozajı aşağı çekilmiş ve iki deneme daha yapılarak 72 cm çökme değeri için % 1,4 olarak belirlenmiştir.

%30 uçucu kül içeren C30 betonunda bir önceki ikame oranında %1,2 katkı oranı yetersiz geldiği için, doğrudan % 1,4 ile başlanmış ancak yine yayılma değeri yeterli seviyeye ulaşmamıştır. Katkı oranı %1,6'ya çıkarıldığında yayılma değeri 77 cm'e ulaştığı için %1,5'de ideal yayılma değerine ulaşılacağı düşünülerek bu oranda deneme yapılmıştır. Ancak 71 cm yayılma değeri, hedeflenen değer aralığında ( $70 \pm 2$  cm) gibi görünse de beton ayrıştığı için bu beton da kabul edilmemiştir. Bu noktadan sonra karışımda katkı oranı ile ilgili kullanılacak herhangi yeni bir değer kalmadığı için agrega oranlarında değişiklik yapılmıştır. Tablo 4.3'de belirtilen %52 0/5 ve %48 5/12 oranları sırasıyla %58 ( $847 \text{ kg/m}^3$ ) ve %42 ( $618 \text{ kg/m}^3$ ) olarak değiştirilmiştir. %1,5 katkı oranı ve yeni agrega oranlarıyla istenilen yayılma hedefi ayrışma olmadan gerçekleşmiştir (70 cm).

Tablo 5.1: Deneysel sonuçları

| BETON SINIFI | MINERAL KATKI TİPİ | MINERAL KATKI İKAME ORANI | ÇİMENTO | UK  | GYFC | SD   | SU   | KATKI |      | 0/5 | 5/12 | ÇÖKME/YAYILMA | T <sub>50</sub> | HAVA İÇERİĞİ (%) | U KUTUSU (mm) | V HUNİSİ (s) | L KUTUSU     | NOTLAR           | BASINÇ DAYANIMI ORT. |                  | 28 GÜNLÜK YARMADA ÇEKME DAYANIMI (MPa) | 28 GÜNLÜK SU İŞLEME DERİNLİĞİ ORT. (mm) |              |    |
|--------------|--------------------|---------------------------|---------|-----|------|------|------|-------|------|-----|------|---------------|-----------------|------------------|---------------|--------------|--------------|------------------|----------------------|------------------|--|---|--------------|----|
|              |                    |                           |         |     |      |      |      | kg    | %    |     |      |               |                 |                  |               |              |              |                  | kg                   | (MPa)            |  |   | 56 gün (MPa) |    |
| C30/37       | UK                 | 0                         | 500     | 0   | 0    | 0    | 250  | 1,4   | 7,00 | 782 | 726  | 68            | 6               | 1,0              | 12            | 8            | 0,93         | ayırışma yok     | 45,4                 | 49,3             | 3,0                                    | 21                                      |              |    |
|              |                    | 10                        | 450     | 50  | -    | 250  | 1,2  | 6,00  | 780  | 725 | 54   | 6             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | yayılma yetersiz | -                                      | -                                       | -            | -  |
|              |                    |                           | 450     | 50  | -    | 250  | 1,5  | 7,50  | 778  | 723 | 74   | 4             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | ayırışma yok     | -                                      | -                                       | -            | -  |
|              |                    |                           | 450     | 50  | -    | 250  | 1,3  | 6,50  | 779  | 725 | 66   | 3             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | yayılma yetersiz | -                                      | -                                       | -            | -  |
|              |                    |                           | 450     | 50  | -    | 250  | 1,4  | 7,00  | 778  | 724 | 72   | 4             | 1,6             | 7                | 9             | 0,81         | 11           | 9                | 0,81                 | ayırışma yok     | 49,1                                   | 53,8                                    | 3,6          | 17 |
|              |                    |                           | 350     | 150 | -    | 250  | 1,4  | 7,00  | 760  | 707 | 67   | 7             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | yayılma yetersiz | -                                      | -                                       | -            | -  |
|              | 350                | 150                       | -       | 250 | 1,6  | 8,00 | 759  | 706   | 77   | 4   | -    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | aşırı ayırışma var   | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 50                 | 350                       | 150     | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 760   | 706  | 71  | 5    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | ayırışma var     | -                                      | -                                       | -            | -  |
|              |                    | 350                       | 150     | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 847*  | 618* | 70  | 6    | 1,6           | 10              | 10               | 0,84          | 14           | 10           | 0,84             | ayırışma yok         | 46,2             | 52,2                                   | 3,4                                     | 13           |    |
|              |                    | 250                       | 250     | -   | 250  | 1,4  | 7,00 | 742   | 690  | 65  | 9    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              |                    | 250                       | 250     | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 741   | 689  | 70  | 7    | 1,4           | 11              | 11               | 0,91          | 14           | 11           | 0,91             | ayırışma yok         | 43,3             | 51,0                                   | 3,1                                     | 14           |    |
|              |                    | 450                       | -       | 50  | -    | 250  | 1,2  | 6,00  | 787  | 732 | 74   | 3             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | -                    | ayırışma yok     | -                                      | -                                       | -            | -  |
| 450          |                    | -                         | 50      | -   | 250  | 1,1  | 5,50 | 788   | 733  | 68  | 3    | 1,8           | 7               | 0,84             | 10            | 7            | 0,84         | ayırışma yok     | 51,7                 | 58,8             | 3,9                                    | 15                                      |              |    |
| GYFC         | 350                | -                         | 150     | -   | 250  | 1,3  | 6,50 | 783   | 728  | 68  | 5    | 1,9           | 8               | 0,90             | 12            | 8            | 0,90         | ayırışma yok     | 54,5                 | 62,3             | 4,2                                    | 12                                      |              |    |
|              | 250                | -                         | 250     | -   | 250  | 1,3  | 6,50 | 780   | 725  | 62  | 9    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | yayılma yetersiz | -                    | -                | -                                      | -                                       |              |    |
|              | 250                | -                         | 250     | -   | 250  | 1,4  | 7,00 | 779   | 725  | 66  | 7    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | yayılma yetersiz | -                    | -                | -                                      | -                                       |              |    |
|              | 250                | -                         | 250     | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 779   | 724  | 71  | 5    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | yayılma yetersiz | -                    | -                | -                                      | -                                       |              |    |
|              | 250                | -                         | 250     | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 869*  | 634* | 69  | 6    | 2,1           | 9               | 0,85             | 13            | 9            | 0,85         | ayırışma yok     | 48,9                 | 61,0             | 3,5                                    | 11                                      |              |    |
|              | 450                | -                         | 50      | -   | 250  | 1,3  | 6,50 | 776   | 721  | 53  | 12   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | ayırışma yok         | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
| SD           | 450                | -                         | 50      | -   | 250  | 1,5  | 7,50 | 774   | 720  | 61  | 11   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | ayırışma yok         | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 450                | -                         | 50      | -   | 250  | 1,7  | 8,50 | 773   | 719  | 68  | 8    | 1,3           | 11              | 0,87             | 11            | 14           | 0,87         | ayırışma yok     | 54,5                 | 62,0             | 4,3                                    | 10                                      |              |    |
|              | 400                | -                         | 100     | -   | 250  | 1,7  | 8,50 | 760   | 707  | 72  | 11   | 1,7           | 11              | 0,86             | 11            | 18           | 0,86         | ayırışma yok     | 56,2                 | 66,0             | 4,4                                    | 8                                       |              |    |
|              | 600                | 0                         | 0       | 180 | 1,5  | 9,0  | 838  | 774   | 72   | 10  | 1,3  | 12            | 10              | 0,91             | 12            | 10           | 0,91         | ayırışma yok     | 89,9                 | 98,3             | 6,6                                    | 9                                       |              |    |
|              | 540                | 60                        | -       | 180 | 1,6  | 9,60 | 826  | 768   | 70   | 11  | 1,4  | 12            | 12              | 0,90             | 12            | 12           | 0,90         | ayırışma yok     | 87,7                 | 100,5            | 7,8                                    | 6                                       |              |    |
|              | 420                | 180                       | -       | 180 | 1,6  | 9,60 | 804  | 747   | 66   | 12  | -    | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
| UK           | 420                | 180                       | -       | 180 | 1,7  | 10,2 | 803  | 747   | 71   | 11  | 1,5  | 11            | 0,87            | 9                | 11            | 0,87         | ayırışma yok | 83,1             | 96,8                 | 7,5              | 5                                      |   |              |    |
|              | 300                | 300                       | -       | 180 | 1,7  | 10,2 | 781  | 726   | 70   | 12  | 1,5  | 10            | 0,88            | 9                | 11            | 0,88         | ayırışma yok | 79,0             | 95,1                 | 7,4              | 5                                      |   |              |    |
|              | 540                | -                         | 60      | -   | 180  | 1,6  | 9,6  | 835   | 776  | 75  | 10   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | ayırışma yok         | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 540                | -                         | 60      | -   | 180  | 1,5  | 9,0  | 835   | 777  | 69  | 11   | 1,9           | 11              | 0,81             | 9             | 11           | 0,81         | ayırışma yok     | 92,5                 | 106,8            | 8,4                                    | 7                                       |              |    |
|              | 420                | -                         | 180     | -   | 180  | 1,6  | 9,6  | 831   | 772  | 72  | 12   | 2,0           | 11              | 0,83             | 8             | 11           | 0,83         | ayırışma yok     | 96,4                 | 111,3            | 8,6                                    | 5                                       |              |    |
|              | 300                | -                         | 300     | -   | 180  | 1,6  | 9,6  | 827   | 769  | 65  | 13   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
| GYFC         | 300                | -                         | 300     | -   | 180  | 1,7  | 10,2 | 826   | 768  | 72  | 13   | 2,1           | 13              | 0,93             | 8             | 13           | 0,93         | ayırışma yok     | 88,3                 | 105,4            | 7,9                                    | 4                                       |              |    |
|              | 540                | -                         | 60      | -   | 180  | 1,6  | 9,6  | 821   | 764  | 63  | 14   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 540                | -                         | 60      | -   | 180  | 1,7  | 10,2 | 821   | 763  | 67  | 13   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 540                | -                         | 60      | -   | 180  | 1,8  | 10,8 | 820   | 762  | 72  | 12   | 1,6           | 10              | 0,93             | 10            | 14           | 0,93         | ayırışma yok     | 101,8                | 113,8            | 9,1                                    | 3                                       |              |    |
|              | 480                | -                         | 120     | -   | 180  | 1,8  | 10,8 | 805   | 748  | 66  | 16   | -             | -               | -                | -             | -            | -            | -                | yayılma yetersiz     | -                | -                                      | -                                       | -            |    |
|              | 480                | -                         | 120     | -   | 180  | 1,9  | 11,4 | 804   | 748  | 71  | 15   | 1,5           | 15              | 0,86             | 9             | 15           | 0,86         | ayırışma yok     | 109,7                | 124,9            | 9,3                                    | 3                                       |              |    |



%50 uçucu kül içeren C 30 betonunda %1,4 katkı oranında yeterli yayılma elde edilememiş, %1,5 oranında ise hedef yayılma değerine ulaşılmıştır.

%10 granüle yüksek fırın cürufu ile üretilen C 30 betonunda, uçucu küledeki gibi %1,2 katkı oran değeri ile başlanmış ve ayrışma olmaksızın hedeflenen değerin üstüne (74 cm) çıkmıştır. Uçucu külede aynı katkı oranında yayılma yetersiz iken, granüle yüksek fırın cürufunda hedeflenen yayılma değerinin üzerine çıkmıştır. Bu durum iki mineral katkının fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birbirinden farklı olmasına bağlanabilir. Ancak granüle yüksek fırın cürufunun inceliğinin uçucu küle göre daha yüksek olması ( $5650 > 4400 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) nedeniyle bu sonucun beklenen bir durum olmadığı söylenebilir. Çünkü malzemenin inceliği arttıkça, artan su ihtiyacından dolayı yayılma değerinin daha düşük gelmesi beklenirdi, ancak burada tam tersi bir sonuç elde edildi. Dolayısıyla incelik gibi fiziksel bir etkinin yanında mineral katkının kimyasal özelliklerinin de taze özellikler üzerinde azımsanmayacak derecede etkili olduğu düşünülebilir. İlk denemedeki katkı oranı düşürüldükten sonra hedeflenen yayılma değeri elde edilmiştir.

%30 granüle yüksek fırın cürufu içeren C30 betonu için % 1,3 katkı oranı ile hedeflenen kıvam elde edilmiştir. 68 cm çökme değeri elde edilmiştir.

%50 granüle yüksek fırın cürufu içeren C30 betonunda ise %1,3 ve %1,4 katkı oranlarında hedeflenen kıvam elde edilememiş ve %1,5'de ise ayrılma gözlenmiştir. %30 uçucu kül ikamesinde olduğu gibi agrega oranları %52-%48'den %58-%42'ye değiştirilerek %1,5 katkı oranında istenen kıvama ulaşılmıştır.

%10 silis dumanı içeren normal dayanımlı betonda, %1,3 ve %1,5 katkı oranlarında hedef çökme değeri elde edilememiştir. %1,7 değerinde ise istenen yayılma değerine ulaşılmıştır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunun hangi ikame oranlarında olursa olsun en fazla %1,5 katkı değerinde hedefe ulaşılırken, silis dumanında bu değerin %1,7 olarak gerçekleşmesi, bu malzemenin inceliğinin (~150.000) çok yüksek olmasından dolayı yüksek su ihtiyacına bağlanabilir.

%20 silis dumanı içeren C30 betonu için hedeflenen yayılma değerine % 1.7 katkı oranı ile ulaşılmıştır. Aslında silis dumanı miktarı arttığı için su ihtiyacının da artacağı düşünülerek %1,7 ile hedefe ulaşılması beklenmemiştir, ancak sonuç tahmin

edilenin aksine gerçekleşmiştir. Bununla birlikte her ne kadar silis dumanı artışının yayılma özelliğini tam tersi etkilediği düşünülse de T50 süresinin daha yüksek olması aslında betonun bu artıştan etkilendiğinin bir göstergesidir. Bu duruma T50 süresinin değerlendirildiği bölümde tekrar değinilecektir.

C80 sınıfı yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında, su/bağlayıcı oranı oldukça düşük olduğu için %1,6 katkı oranı ile başlanmış ve hedef kıvam elde edilmiştir. % 30 uçucu kül ikamesinde ise %1,6 katkı oranı yetersiz kalmış ve %1,7 katkı oranı ile istenen kıvam elde edilmiştir. Yine benzer şekilde % 50 ikame oranında da %1,7 ile 70 cm değerine ulaşılmıştır. C80 sınıfı KYB'larda kimyasal katkı, yüksek oranda kullanılmıştır. Yüksek dayanımlı KYB'da su miktarı toplam bağlayıcıya göre çok daha az kullanıldığından dolayı ayrışma riski de tamamen ortadan kalkmıştır. Ancak betonlar daha viskoz hale gelmiştir.

C80 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında %1,6 katkı oranı ile başlanmış olmasına rağmen yine ayrışma olmaksızın hedeflenen değer üstüne çıkılmıştır. İkinci olarak %1,5 katkı oranı denendiğinde ise hedef kıvam elde edilmiştir (69 cm.)

C80 sınıfı yüksek dayanımlı KYB'da %30 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında %1,6 ve %50 ikame oranında ise %1,7 katkı oranı değerinde istenilen kıvam yakalanmıştır. Bu betonlarda da yine ayrışma gözlenmemiştir.

%10 silis dumanı içeren yüksek dayanımlı KYB'da %1,6 ve %1,7 katkı oranlarında hedef değer elde edilememiştir. Oysa bu katkı oranları uçucu kül ve yüksek fırın cürufunda istenilen yayılma değerleri rahatlıkla elde edilmişti. Burada da C30 sınıfında olduğu gibi silis dumanının inceliği su gereksinimini arttırdığı için daha fazla katkıya ihtiyaç duyulmuştur. %1,8 değerinde ise istenilen yayılma değerine ulaşılmıştır. %20 silis dumanı ikamesinde ise yine aynı gerekçelerle %1,8 oranında hedef yakalanamazken; %1,9 katkı oranına çıkıldığında istenilen hedefe ulaşılmıştır.

Genel duruma bakıldığında çökme/yayılma deneyi için şunlar söylenebilir:

1. Yüksek fırın cürufu uçucu külden daha ince bir malzeme olmasına rağmen daha düşük katkı oranlarında istenilen kıvamın yakalanmasını sağlamıştır. Su



ihtiyacı anlamında tezat gibi görünen bu durum silis dumanında ise beklenildiği gibi gerçekleşmiştir. Silis dumanı çok ince bir malzeme olduğu için uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufuna göre çok daha yüksek oranlarda kimyasal katkıya ihtiyaç duyulmuştur. Tüm bu sonuçlar mineral katkıların birbirlerine göre fiziksel ve kimyasal yapılarının değişik olmasına bağlanabilir.

2. Karışım parametreleri deney sistematliğini bozması açısından sabit tutulmaya çalışılmakla birlikte zaman zaman taze betonun kabul edilebilir bir seviyede olabilmesi için, deney değişkenlerinin dışında da karışımlara müdahale zorunluluğu çıkmıştır. C30 %30 uçucu kül ikamesi ve C30 %50 yüksek fırın cürufu ikamesinde istenilen betonu elde edebilmek için agrega miktarları değiştirilmiştir. Bu durum mineral katkı miktarı, su/bağlayıcı oranı, su miktarı ve katkı dozajının yanında özellikle tane dağılımı başta olmak üzere agrega özelliklerinin de önemini vurgulamaktadır.
3. C80 sınıfı betonlarda su/bağlayıcı oranı düşük olduğu için tüm mineral katkıların tüm ikame oranlarında C30 sınıfı betona göre daha yüksek katkı oranları gerçekleşmiştir.

### 5.1.2. Çökme-Yayılmada T<sub>50</sub> Süreleri Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Normal dayanımlı %10 uçucu kül ikame oranında 4 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 6 s; % 50 ikame oranında ise 7 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum uçucu kül arttıkça viskozitenin de arttığını göstermektedir.

Normal dayanımlı %10 yüksek fırın cürufu ikame oranında 3 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 5 s; % 50 ikame oranında ise 6 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum uçucu küle olduğu gibi granüle yüksek fırın cürufunda da kullanım miktarındaki artışın viskozitenin artmasına neden olduğunu göstermektedir. Ancak uçucu küle göre değerlendirme yapıldığında granüle yüksek fırın cürufunun sabit bir ikame oranında daha az viskoziteye neden olduğu söylenebilir.

Normal dayanımlı %10 silis dumanı ikame oranında 8 s; %20 ikame oranında ise 11 s değeri elde edilmiştir. %10 ikame oranında elde edilen değer (8 s) hem uçucu kül hem de granüle yüksek fırın cürufunun aynı ikame oranlarında elde edilen değerlere göre yüksek olduğu için silis dumanının viskoziteyi artırma noktasında

çok etkili bir malzeme olduğu söylenebilir. Ayrıca %20 ikame oranında elde edilen 11 s değeri de oldukça yüksek bir değer olup, aynı düşünceyi doğrular niteliktedir.

Yüksek dayanımlı %10 uçucu kül ikame oranında 11 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında yine 11 s ve % 50 ikame oranında ise 12 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum C30 betonlarının aksine uçucu kül arttıkça viskozitenin çok etkilenmediğini göstermektedir. Ancak elde edilen değerler ortalama 11,3 s C30 betonlarına göre ortalama 5,7 s daha yüksektir. Bu durum beton sınıfının yükselmesi dolayısıyla azalan su/bağlayıcı oranının viskoziteye olan etkisi olarak açıklanabilir. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça viskozite artmıştır.

Yüksek dayanımlı %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 11 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 12 s; % 50 ikame oranında ise 13 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum granüle yüksek fırın cürufunun artışıyla viskozitenin de arttığını göstermektedir. Uçucu küle göre değerlendirme yapıldığında C30 betonlarının aksine granüle yüksek fırın cürufunun sabit bir ikame oranında benzer viskozitelere neden olduğu söylenebilir.

Yüksek dayanımlı %10 silis dumanı ikame oranında 12 s; %20 ikame oranında ise 15 s değeri elde edilmiştir. %10 ikame oranında elde edilen değer hem uçucu kül hem de granüle yüksek fırın cürufunun aynı ikame oranlarında elde edilen değerlerle aynı mertebededir. C30 betonlarında silis dumanı diğer iki malzemeye göre viskoziteyi oldukça arttırırken C80 betonunda aynı durum gerçekleşmemiştir. Diğer taraftan %20 ikame oranında elde edilen 15 s değeri de oldukça yüksek bir değer olup, C30 betonlarında elde edilen sonucu bir kez daha doğrulamıştır. Silis dumanının artması viskoziteyi arttırmıştır.

Genel duruma bakıldığında  $T_{50}$  süreleri için şunlar söylenebilir:

1. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerleri artmıştır.
2. C80 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerlerinde önemli değişimler görülmemiştir. Her üç malzeme için tüm ikame oranlarında (silis dumanı %20 hariç) 11 s ile 13 s arasında değerler elde edilmiştir.



3. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufuna göre betonları daha viskoz yapmıştır. Silis dumanı ise viskoziteyi artırma noktasında her iki malzemeye göre de çok daha etkili bir malzemedir.
4. C30 sınıfı betonlarındaki  $T_{50}$  süreleri mineral katkı tipi ve ikame oranından oldukça etkilenirken; C80 sınıfı betonlar bu iki faktörden bağımsız bir davranış sergileyerek her tip katkı ve tüm ikame oranlarında benzer özellikler elde edilmiştir.

### 5.1.3. Hava İçeriği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 5.1'e bakıldığında her iki beton sınıfında, tüm mineral katkı tiplerinde ve tüm ikame oranlarında hava içeriğinin %1,3 ve %2,1 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum yukarıda bahsedilen bütün parametrelerin hava içeriği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiş, dolayısıyla hava içeriğinin bu parametrelere bağlı olarak değiştiğinden bahsetmek mümkün olmayabilir.

### 5.1.4. U Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

C30 sınıfı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 11 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 14 mm; % 50 ikame oranında ise yine 14 mm değerleri elde edilmiştir. Bu durum %10'un üzerinde kullanılması durumunda uçucu külün betonun donatılar arasından geçiş yeteneğini azalttığına işaret etmektedir.

C30 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 10 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 12 mm; % 50 ikame oranında ise 13 mm değerleri elde edilmiştir. Bu durum uçucu külde olduğu gibi granüle yüksek fırın cürufunda da kullanım miktarındaki artışın geçiş yeteneğini azalttığı şeklinde yorumlanabilir.

C30 sınıfı betonlarda %10 silis dumanı ikame oranında 11 mm; %20 ikame oranında ise yine 11 mm değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla geçiş yeteneğinin silis dumanı miktarından bağımsız olduğu söylenebilir.

C80 sınıfı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 12 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 11 mm ve % 50 ikame oranında ise 9 mm değerleri

elde edilmiştir. Bu durum C30 betonlarının aksine uçucu kül arttıkça geçiş yeteneğini arttırdığını göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için elde edilen U kutusu değerleri C30 betonlarına göre düşük değerlerde çıkmıştır. Uçucu kül kullanılması durumunda C80 sınıfı betonların geçiş yeteneğinin daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

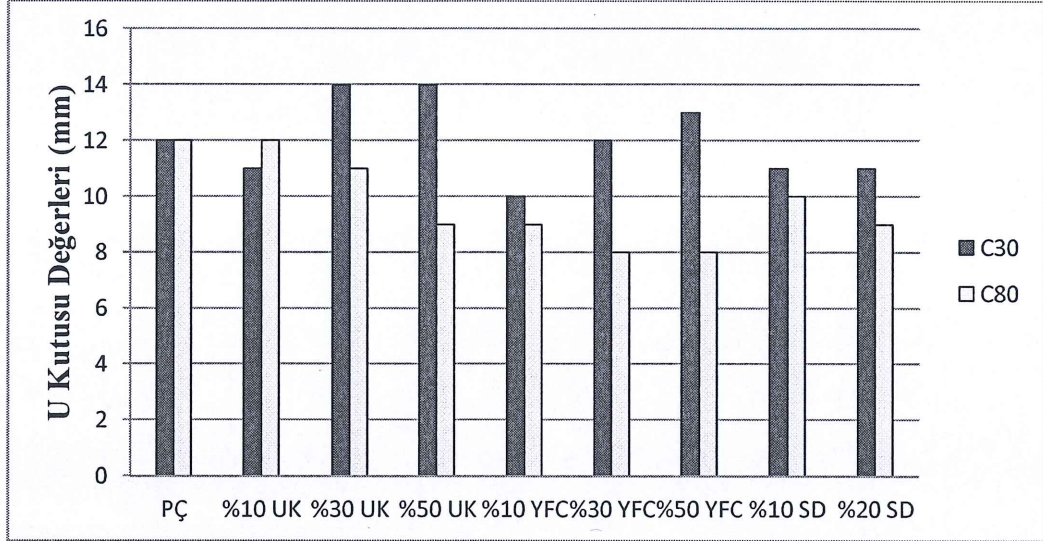
C80 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 9 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 8 mm; % 50 ikame oranında ise yine 8 mm değerleri elde edilmiştir. Bu durum granüle yüksek fırın cürufunun artışıyla geçiş yeteneğinin çok etkilenmediğini göstermektedir. Uçucu küle göre değerlendirme yapıldığında ise, tüm ikame oranları için geçiş yeteneğinin granüle yüksek fırın cürufunda daha iyi olduğu sonucuna ulaşmak mümkündür.

C80 sınıfı betonlarda %10 silis dumanı ikame oranında 10 mm; %20 ikame oranında ise 9 mm değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla C30 betonlarında olduğu gibi geçiş yeteneğinin silis dumanı miktarından bağımsız olduğu söylenebilir. U Kutusu sonuçlarını gösteren grafik Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

Genel duruma bakıldığında U kutusu deneyi için şunlar söylenebilir:

1. Her iki beton sınıfına ait tüm katkı tipi ve kullanım oranlarında “0” mm elde edilmemiştir. Dolayısıyla geçiş yeteneği mükemmel olan bir betondan söz etmek mümkün olmamıştır.
2. Tüm betonlar Tablo 3.3’de verilmiş olan 0-30 mm kriterleri arasında kalmıştır.
3. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanım miktarı arttıkça geçiş yeteneğinin azaldığından bahsetmek mümkünken, silis dumanının artışıyla bu özelliğin değişmediği söylenebilir.
4. C80 sınıfı betonlarda uçucu külün kullanım miktarı arttıkça C30 betonlarının aksine geçiş yeteneği artmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artışıyla ise bu özellik kayda değer bir değişiklik yaratmamıştır.
5. Genel olarak C80 sınıfı betonların geçiş yeteneğinin C30 sınıfı betonlardan daha iyi olduğu söylenebilir.





Şekil 5.1: C30 ve C80 sınıfı KYB'ların U kutusu değerleri

#### 5.1.5. V Hunisi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

C30 sınıfı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 9 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 10 s; % 50 ikame oranında ise 11 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum uçucu kül arttıkça viskozitenin de arttığını göstermektedir.

C30 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 7 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 8 s; % 50 ikame oranında ise 9 sn değerleri elde edilmiştir. Bu durum uçucu külde olduğu gibi granüle yüksek fırın cürufunda da kullanım miktarındaki artışın viskozitenin artmasına neden olduğunu göstermektedir. Ancak uçucu küle göre değerlendirme yapıldığında granüle yüksek fırın cürufunun sabit bir ikame oranında daha az viskoziteye neden olduğu söylenebilir. Bu durum yine viskozitenin bir göstergesi olan T50 süreleriyle ilgili değerlendirme bölümünde de benzer şekilde ortaya konulmuştur.

C30 sınıfı betonlarda %10 silis dumanı ikame oranında 14 s; %20 ikame oranında ise 18 s değeri elde edilmiştir. %10 ikame oranında elde edilen değer hem uçucu kül hem de granüle yüksek fırın cürufunun aynı ikame oranlarında elde edilen değerlere göre çok yüksek olduğu için silis dumanının viskoziteyi artırma noktasında çok etkili bir malzeme olduğu söylenebilir. Ayrıca %20 ikame oranında elde edilen 18 s değeri de oldukça yüksek bir değer olup, aynı düşüncüyü doğrular

niteliktedir. Bu durum yine viskozitenin bir göstergesi olan T50 süreleriyle ilgili değerlendirme bölümünde de benzer şekilde ortaya konulmuştur.

C80 sınıfı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 12 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında yine 12 s ve % 50 ikame oranında ise 11 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum C30 betonlarının aksine uçucu kül arttıkça viskozitenin çok etkilenmediğini göstermektedir. Ancak elde edilen değerler C30 betonlarıyla yakın değerlerdir. T50 sürelerinde yaklaşık 2 katlık bir süre farkı var iken V hunisi deneylerinde ise yakın değerler elde edilmiştir.

C80 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 11 s değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 11 s; % 50 ikame oranında ise 13 s değerleri elde edilmiştir. Bu durumda C30 sınıfı betonlara göre, C80 beton sınıfında kullanım miktarının artmasıyla viskozitenin arttığını söylemek mümkündür.

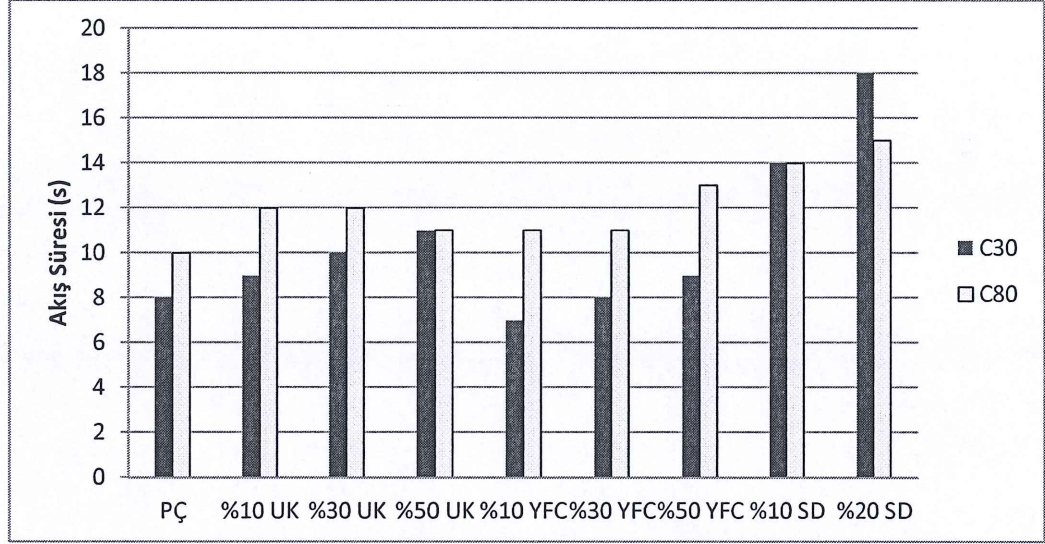
C80 sınıfı betonlarda %10 silis dumanı ikame oranında 14 s; %20 ikame oranında ise 15 s değeri elde edilmiştir. %10 ikame oranında elde edilen değer hem uçucu kül hem de granüle yüksek fırın cürufunun aynı ikame oranlarında elde edilen değerlerden yüksektir. C30 betonlarında silis dumanı diğer iki malzemeye göre viskoziteyi oldukça artırırken C80 betonunda bu durumun benzer şekilde gerçekleştiğini söylemek mümkün değildir. Diğer taraftan %20 ikame oranında elde edilen 15 s değeri de yüksek bir değer olup, C30 betonlarında elde edilen sonucu bir kez daha doğrulamıştır. V Hunisi sonuçları Şekil 5.2'de gösterilmiştir.

Genel duruma bakıldığında V hunisi deneyi için şunlar söylenebilir:

1. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile akış sürelerini ve dolayısıyla viskoziteyi artmıştır. Bu durum T50 sürelerindeki durumu doğrulamıştır.
2. C80 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerlerinde önemli değişimler görülmemiştir. Bu durum yine T50 sürelerindeki durumu doğrulamıştır.
3. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufuna göre betonları daha viskoz yapmıştır. Silis dumanı ise viskoziteyi artırma noktasında her iki malzemeye göre de çok daha etkili bir malzemedir.



4. C30 sınıfı betonlarındaki akış süreleri mineral katkı tipi ve ikame oranından oldukça etkilenirken; C80 sınıfı betonlar bu iki faktörden bağımsız bir davranış sergileyerek her tip katkı ve tüm ikame oranlarında benzer özellikler elde edilmiştir.



Şekil 5.2: C30 ve C80 sınıfı KYB'ların V hunisi değerleri

#### 5.1.6. L Kutusu Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

C30 sınıfı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 0,81 değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 0,84; % 50 ikame oranında ise 0,91 değeri elde edilmiştir. Bu durum uçucu kül arttıkça donatılar arasından geçiş yeteneğinin arttığını göstermektedir. Çünkü bu oran arttıkça geçiş yeteneği artmaktadır.

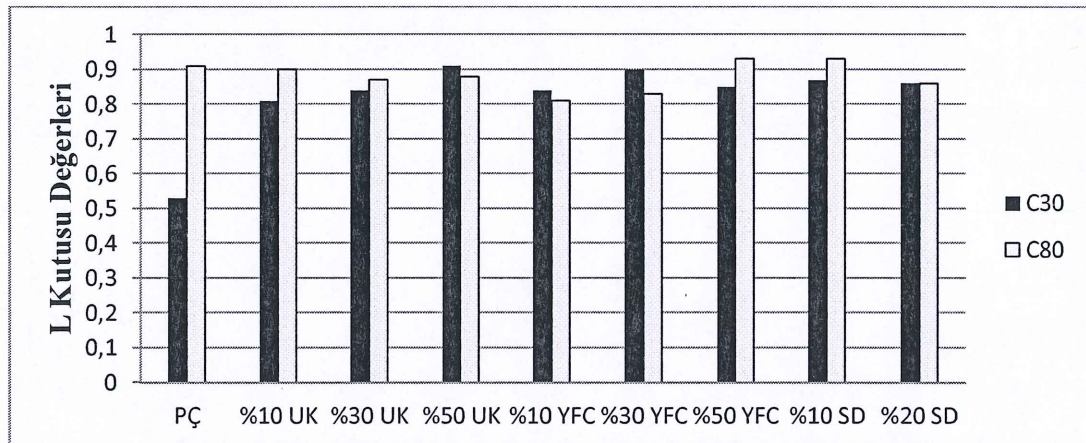
C30 sınıfı betonlarda %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 0,84 değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 0,90; % 50 ikame oranında ise 0,85 değeri elde edilmiştir. %10 ve %30 ikameleri uçucu külde olduğu gibi granüle yüksek fırın cürufunda da kullanım miktarındaki artışın geçiş yeteneğini arttırdığı şeklinde yorumlansa da %50 ikame oranında bunun tersi görülmüştür. Bu durum geçiş yeteneği ile ilgili optimum bir ikame oranına (en fazla %30) ya da ilgili beton için hedeflenen yayılma değerine ulaşamadığı için değiştirilen agrega oranlarına bağlanabilir.

C30 sınıfı betonlarda %10 ya da % 20 silis dumanı ikame oranında benzer sonuçlar (0,87 ve 0,86) elde edildiği için geçiş yeteneğinin etkilenmediğini söylemek mümkündür.

Yüksek dayanımlı betonlarda %10 uçucu kül ikame oranında 0,90 değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 0,87 ve % 50 ikame oranında ise 0,88 değerleri elde edilmiştir. Uçucu kül miktarı arttıkça geçiş yeteneğinin bir miktar azaldığı söylenebilir. %10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 0,81 değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 0,83; % 50 ikame oranında ise 0,93 değerleri elde edilmiştir. Granüle yüksek fırın cürufu miktarı arttıkça uçucu külün aksine geçiş yeteneği artmıştır. %10 ya da % 20 silis dumanı ikame oranlarında sırasıyla 0,93 ve 0,86 değerleri elde edilmiştir. Silis dumanı miktarı arttıkça geçiş yeteneği azalmıştır. L Kutusu sonuçları Şekil 5.3'de gösterilmiştir.

Genel duruma bakıldığında L Kutusu deneyi için şunlar söylenebilir:

1. Normal dayanımlı KYB'larda uçucu kül arttıkça geçiş yeteneği artarken, granüle yüksek fırın cürufunda bu özellik kısmen gerçekleşmiştir. Silis dumanı miktarı ise geçiş yeteneği üzerinde etkili olmamıştır.
2. Yüksek dayanımlı KYB'larda uçucu kül arttıkça geçiş yeteneği normal betonlarının aksine azalmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ise C30 betonlarındaki gibi geçiş yeteneğini arttırmıştır. Dolayısıyla uçucu kül beton sınıfı değiştiğinde farklı davranışlar sergilerken, granüle yüksek fırın cürufunun davranışının çok etkilenmediğini söylemek mümkündür. Silis dumanına bakıldığında ise geçiş yeteneği azalmıştır.



Şekil 5.3: C30 ve C80 sınıfı KYB'ların L kutusu değerleri



## 5.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

### 5.2.1. Basınç Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Normal dayanımlı KYB'larda %10 uçucu kül ikame oranında, 28. Günde 49,1 MPa elde edilirken %30 uçucu kül ikamesinde 46,2 MPa, %50 uçucu kül ikamesinde ise 43,3 MPa değeri elde edilmiştir. Uçucu kül miktarı arttıkça basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. 56. günde ise %10, %30 ve %50 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %9,5, %13 ve %17,8 oranında artışlar yaşanmıştır. Bu durum puzolanik reaksiyonların devam ettiğinin bir göstergesidir.

%10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında, 28. günde 51,7 MPa elde edilirken %30 granüle yüksek fırın cürufu ikamesinde 54,5 MPa, %50 granüle yüksek fırın cürufu ikamesinde ise 48,9 MPa değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla uçucu külün aksine dayanım için %30 optimum bir ikame oranı ortaya çıkmıştır. Genel ortalamaya bakıldığında ise granüle yüksek fırın cürufunun uçucu küle göre daha yüksek dayanım verdiği görülmektedir. 56. günde ise %10; %30 ve %50 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %13,7, %14,3 ve %24,7 oranında artışlar yaşanmıştır.

%10 silis dumanı ikame oranında 28. günde 54,5 MPa elde edilirken %20 silis dumanı ikamesinde 56,2 MPa elde edilmiştir. Silis dumanı arttıkça çok küçük bir dayanım artışı meydana gelmemiştir. Bununla beraber en yüksek dayanım ortalaması silis dumanında ortaya çıkmıştır. 56. günde ise %10 ve %20 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %13,8 ve %17,4 oranında artışlar yaşanmıştır.

Genel olarak C30 sınıfında 28. günden 56. güne geçişteki dayanım artışı, tüm mineral katkı tiplerinde ikame oranı arttıkça artış göstermiştir.

Yüksek dayanımlı KYB'larda %10 uçucu kül ikame oranında 28. günde 87,7 MPa elde edilirken %30 uçucu kül ikamesinde 83,1 MPa, %50 uçucu kül ikamesinde ise 79 MPa değeri elde edilmiştir. Uçucu kül miktarı arttıkça C30 sınıfı betonlarda olduğu gibi basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir. Diğer taraftan C80 sınıfı beton için gerekli olan 95 MPa değeri elde edilememiştir. 56. günde ise %10; %30 ve %50 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %14,5, %16,4 ve %20,4 oranında artışlar yaşanmıştır.

%10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 28. günde 92,5 MPa elde edilirken %30 ikame oranında 96,4 MPa, %50 ikame oranında ise 88,3 MPa değeri elde edilmiştir. Dolayısıyla C30 betonunda olduğu gibi dayanım için optimum ikame oranı % 30'dur. Bu optimum oranın dışında 95 MPa değeri elde edilememiştir. Genel ortalamaya bakıldığında ise yine C30 betonunda olduğu gibi granüle yüksek fırın cürufunun uçucu küle göre daha yüksek dayanım verdiği görülmektedir. 56. günde ise %10; %30 ve %50 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %15,4, %15,4 ve %19,4 oranında artışlar yaşanmıştır.

%10 silis dumanı ikame oranında 28. günde 101,8 MPa elde edilirken %20 silis dumanı ikamesinde 109,7 MPa elde edilmiştir. Silis dumanı arttıkça dayanım artmıştır. C30 betonunda olduğu gibi en yüksek dayanım ortalaması silis dumanında ortaya çıkmıştır. 56. günde ise %10 ve %20 ikame oranlarında 28. güne göre sırasıyla %11,8 ve %13,9 oranında artışlar yaşanmıştır.

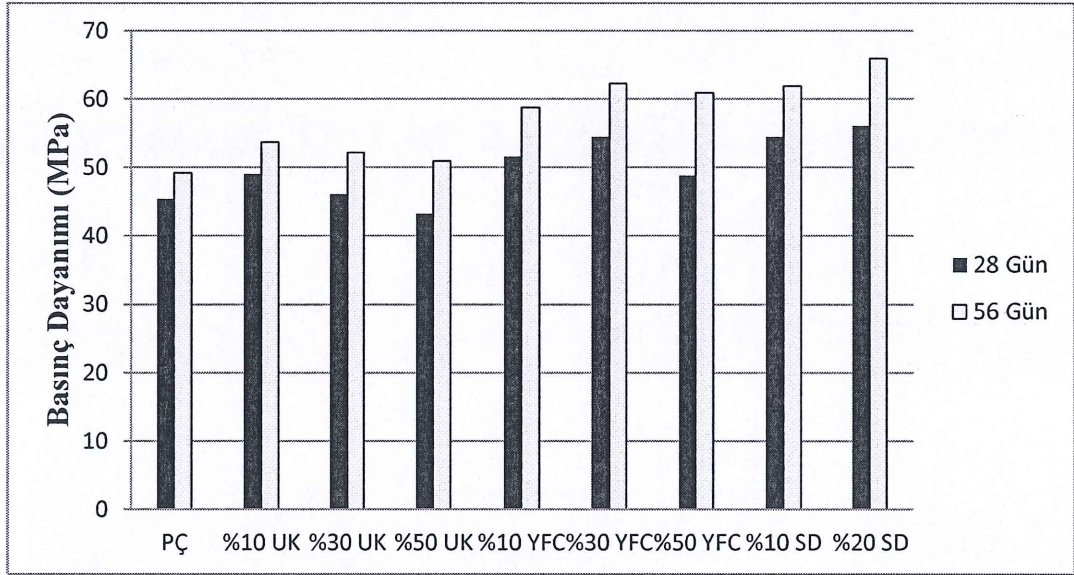
Genel olarak C80 sınıfında da C30 sınıfında olduğu gibi 28. günden 56. güne geçişteki dayanım artışı, tüm mineral katkı tiplerinde ikame oranı arttıkça artış göstermiştir. Basınç dayanımı sonuçları Şekil 5.4 ve 5.5 'de verilmiştir.

Genel duruma bakıldığında basınç dayanımı için şunlar söylenebilir:

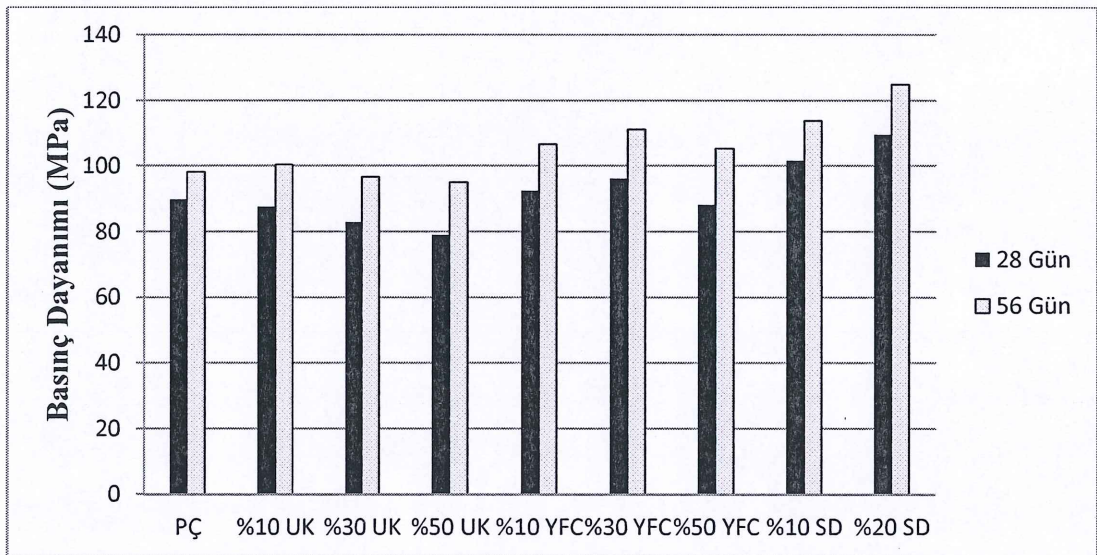
1. En yüksek dayanımlar C30 ve C80 sınıfı betonlarda silis dumanı ile elde edilmiştir. Bu durum silis dumanının dünya literatüründe de bilindiği gibi çok etkili bir puzolan olmasına bağlanabilir. Diğer taraftan TSEN 206 standardında da diğer puzolanlara göre etkinlik katsayısının yüksek olması da bunun bir göstergesidir. Diğer taraftan silis dumanı miktarının artışı C30 için önemli bir artış sağlamamışken, C80 betonunda ~%8'lik bir artış sağlamıştır.
2. C30 ve C80 sınıfı betonlarda uçucu kül miktarı arttıkça dayanımda sistematik bir şekilde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca uçucu kül kullanımıyla C80 betonu elde edilememiştir.
3. C30 ve C80 sınıfı betonlarda granüle yüksek fırın cürufu için optimum kullanım oranı %30 olarak belirlenmiştir. Her kullanım oranında C30 dayanımı elde edilirken, C80 sınıfı betonda gerekli dayanım sadece optimum oran olan %30 için elde edilebilmiştir.



4. Bütün kullanım oranlarında C80 betonunu sağlayan tek malzeme silis dumanı olmuştur. Diğer malzemelerde kullanım miktarına bağlı olarak değişen ve hedeflenen değerin altında kalan dayanımlar elde edilmiştir.
5. C80 sınıfı tüm betonlar patlayarak kırılmıştır.
6. 56. gündeki dayanımlar 28. gündeki dayanımlara göre C30 sınıfında %25 mertebelerine; C80 sınıfında ise %20 mertebelerine kadar artış göstermiştir. Bu durum mineral katkıların puzolanik etkisinin zaman geçtikçe devam ettiğinin bir göstergesidir.



Şekil 5.4: C30 betonunun basınç dayanımı gelişimi



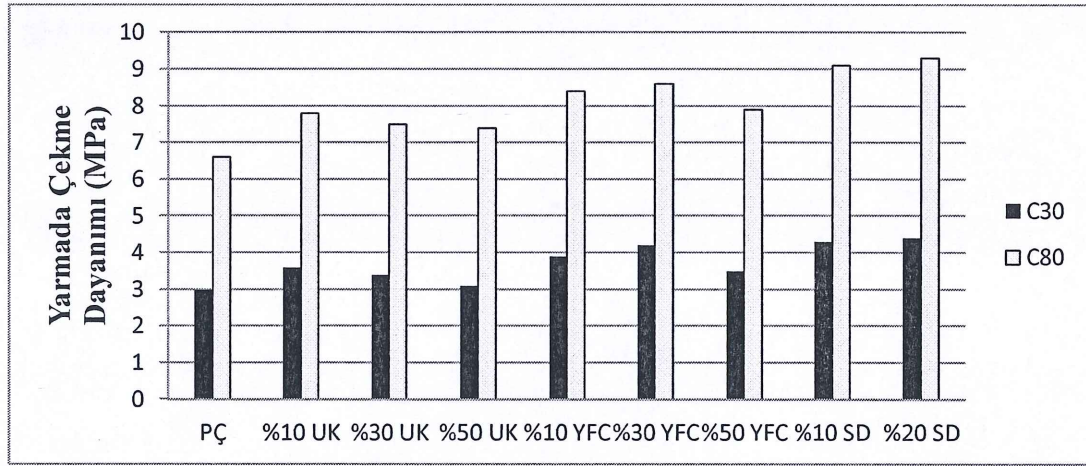
Şekil 5.5: C80 betonunun basınç dayanımı gelişimi

### 5.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yarmada çekme dayanımı sonuçları beklenildiği üzere basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir.

1. En büyük yarmada çekme değerleri C30 ve C80 sınıfı betonlarda silis dumanı katkılı elde edilmiştir.
2. C30 ve C80 sınıfı betonlarda uçucu kül miktarı arttıkça dayanımda azalma meydana geldiği görülmüştür.
3. C30 ve C80 sınıfı betonlarda granüle yüksek fırın cürufu için basınç dayanımında olduğu gibi optimum kullanım oranı % 30 olarak belirlenmiştir.

Yarmada çekme dayanım sonuçları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6: Yarmada çekme dayanımı gelişimi

### 5.2.3. Su İşleme Derinliği Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Su işleme derinliği deneyleri TS EN 12390-8 Basınç Altında Su İşleme Derinliği Tayini Standardı kapsamında yapılmıştır. Deney, zamana bağlı olarak betona giren su miktarının ölçülmesine, belirli bir süre ve su basıncı altında tutulan numunelerin yarılarak su işleme derinliğinin kuru yüzey ile ıslak yüzey temas hattının çizilmesine ve su basıncı uygulanan yüzeyden olan uzaklığının ölçülmesine göre yapılmaktadır.

15×15×15 cm küp numuneler 20±2°C de 28 gün boyunca su kürüne tabi tutulmuştur. Daha sonra üst ve alt yüzeylerinden su geçecek/geçebilecek kısımlar dışında tamamen su yalıtım malzemesi ile yalıtılmıştır. Bu şekilde bir gün



bekletildikten sonra numuneler geçirgenlik cihazına bağlanmıştır. Numunelere TS EN 12390-8'de belirtilen  $500 \pm 50$  kPa'lık havası alınmış basınçlı saf su tatbik edilmek üzere deneye toplam 72 saat süreyle devam edilmiştir. Deney bitiminde numuneler geçirgenlik deney düzeneğinden çıkartılarak yarmada çekme deney presi kullanılarak su basınç uygulama yönüne paralel bir şekilde ortadan ikiye ayrılmıştır. Yarılan yüzeyde yaş ve kuru bölge arasındaki hat ayrımı markör kalem ile belirlenerek su işleme derinliği çizilmiştir. Daha sonra çizilmiş olan hattın basınç uygulanan yüzeye olan uzaklığı dikkatli bir şekilde ölçülerek su işleme derinliği belirlenmiştir.

Normal dayanımlı KYB'larda %10 uçucu kül ikame oranında 17 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 13 mm; % 50 ikame oranında ise 14 mm değeri elde edilmiştir. Her ne kadar basınç dayanımı en yüksek olan %10 ikamesinde en düşük derinlik beklense de durum böyle gerçekleşmemiştir. Dayanım düşmüş olmasına rağmen geçirgenlik azalmıştır. Bu durum geçirimsizliğin doğrudan basınç dayanımı ile ilişkili olmadığını, puzolanik malzeme kullanımının veya kullanımdaki artışın da geçirgenliği azalttığını ortaya koymaktadır.

%10 granüle yüksek fırın cürufu ikame oranında 15 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 12 mm; % 50 ikame oranında ise 11 mm değeri elde edilmiştir. Burada da uçucu küle benzer bir durum ortaya çıkmıştır. En düşük dayanım % 50 ikame oranında gerçekleşmişken en düşük geçirimsizlik de yine %50 oranında gerçekleşmiştir. Bu durum yine puzolanik malzeme miktarındaki artışa bağlanabilir.

%10 silis dumanı ikame oranında 10 mm değeri elde edilirken; %20 ikame oranında 8 mm değeri elde edilmiştir. Geçirgenlik basınç dayanımıyla orantılılık göstermiştir. Dayanım arttıkça geçirgenlik azalmıştır. Ayrıca en düşük geçirgenlik değerleri silis dumanında elde edilmiştir.

Yüksek dayanımlı KYB'larda %10 uçucu kül ikame oranında 6 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 5 mm; % 50 ikame oranında ise yine 5 mm değeri elde edilmiştir. C30 betonlarının aksine burada puzolanik etkinin geçirimsizlik üzerindeki etkisini net olarak görmek mümkün olmamıştır. Kullanım miktarı arttıkça dayanımı basınç değerleri düşmesine rağmen geçirimsizlikte büyük bir fark oluşmamıştır.

%10 yüksek fırın cürufu ikame oranında 7 mm değeri elde edilirken; %30 ikame oranında 5 mm; % 50 ikame oranında ise 4 mm değeri elde edilmiştir. Burada da C30 sınıfı betonlara benzer bir durum ortaya çıkmıştır. En düşük dayanım % 50 ikame oranında gerçekleşmişken en düşük geçirimsizlik yine %50 oranında gerçekleşmiştir. Bu durum puzolanik malzeme miktarındaki artışa bağlanabilir.

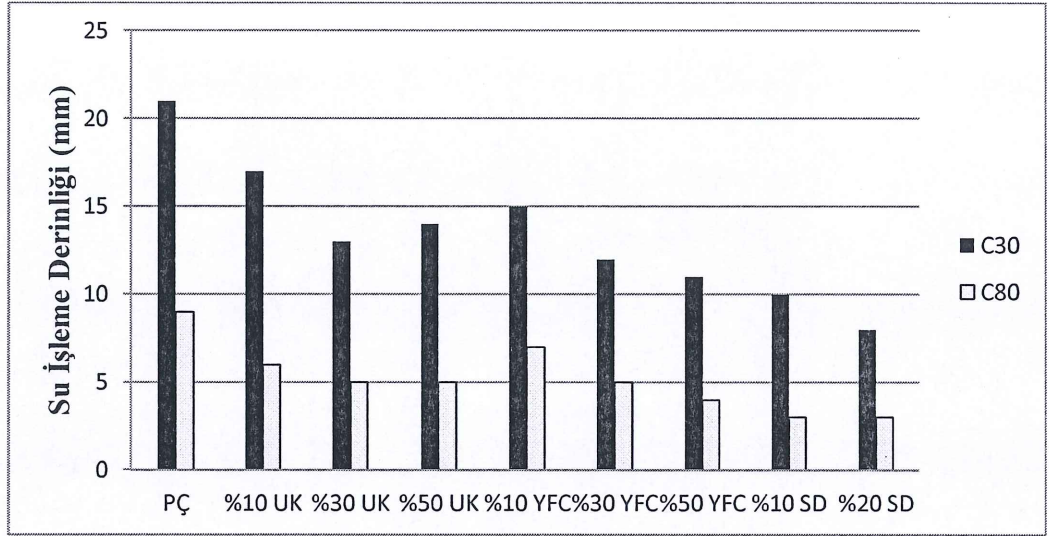
%10 silis dumanı ikame oranında 3 mm değeri elde edilirken; %20 ikame oranında yine 3 mm değeri elde edilmiştir. 100 MPa'ın üzerinde elde edilen değerler çok yüksek olduğu için bu mertebeden sonra gerek puzolanik etki gerekse basınç dayanımının değişimiyle geçirgenliğin azalması ihtimalinin ortadan kalkmış olduğunu söylemek mümkündür. Su işleme derinliği sıfıra çok yaklaştığı için bundan sonraki basınç artışı ya da puzolanik malzeme artışının su işleme derinliğine çok büyük bir faydası olmayacaktır. Beton böyle bir durumda tabii ki daha geçirimsiz olacaktır ancak su işleme derinliği deneyi bunu tespit etmede yetersiz kalacaktır. Dolayısıyla bu mertebeden sonraki geçirimsizlik ölçümleri için başka deney metodu kullanılmalıdır. Su İşleme derinliği sonuçları Şekil 5.7'de verilmiştir.

Genel olarak su işleme derinliği deneyi için şunlar söylenebilir:

1. C80 sınıfı betonlarda tüm malzemeler ve tüm kullanım oranları için geçirimsizlik değerleri beklenildiği üzere C30 sınıfı betonlara göre daha düşük çıkmıştır.
2. C30 sınıfı betonlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunda en düşük dayanımlarda geçirgenlik de en düşük çıkmıştır. Geçirgenliğin dayanımla orantılı olacağı düşünülse de puzolanik etki daha baskın rol oynamıştır. Dayanım düşük olmasına rağmen geçirgenlik düşmüştür. Silis dumanında ise geçirgenlik basınç dayanımıyla orantılılık göstermiştir. Dayanım arttıkça geçirgenlik azalmıştır. Ayrıca en düşük geçirgenlik değerleri silis dumanında elde edilmiştir.
3. C80 sınıfı betonlarda da yine en düşük geçirgenlik değerleri silis dumanında elde edilmiştir.
4. C80 sınıfı betonlarda dayanım çok yüksek olduğu için puzolanik etki net olarak görülememiştir.
5. Her iki beton sınıfında da mineral katkı kullanılmayan şahit karışım en yüksek geçirimsizlik değerine sahiptir. Bu durumun, mineral katkıların



geçirimsizliği sağlamak bakımından önemli bir rol üstlendiğinin kanıtı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 5.7: Su işleme derinliği değerleri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin mineral katkı kullanımına bağlı olarak nasıl değiştiğinin tespitine yönelik deneyler yapılmış ve elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

Doldurma kabiliyetini gösteren çökme sonrası yayılma deneyi için şunlar söylenebilir:

- Yüksek fırın cürufu uçucu külden daha ince bir malzeme olmasına rağmen daha düşük katkı oranlarında istenilen kıvamın yakalanmasını sağlamıştır. Su ihtiyacı anlamında bir tezat gibi görünen bu durum silis dumanında ise beklenildiği gibi gerçekleşmiştir. Silis dumanı çok ince bir malzeme olduğu için uçucu kül ve yüksek fırın cürufuna göre çok daha yüksek oranlarda katkıya ihtiyaç duymuştur. Tüm bu sonuçlar mineral katkıların birbirlerine göre fiziksel ve kimyasal yapılarının değişik olmasına bağlanabilir.
- Karışım parametreleri deney sistematüğini bozmaması açısından sabit tutulmaya çalışılmakla birlikte zaman zaman taze betonun kabul edilebilir bir seviyede olabilmesi için, deney değişkenlerinin dışında da karışımlara müdahale zorunluluğu çıkmıştır. C30 %30 uçucu kül ikamesi ve C30 %50 yüksek fırın cürufu ikamesinde istenilen betonu elde edebilmek için agrega miktarları değiştirilmiştir. Bu durum mineral katkı miktarı, su/bağlayıcı oranı, su miktarı ve katkı dozajının yanında özellikle tane dağılımı başta olmak üzere agrega özelliklerinin de önemini vurgulamaktadır.
- C80 sınıfı betonlarda su/bağlayıcı oranı düşük olduğu için tüm mineral katkıların tüm ikame oranlarında C30 sınıfı betona göre daha yüksek katkı oranları gerçekleşmiştir.

Doldurma kabiliyetini gösteren 50 cm'e yayılma süresi ( $T_{50}$ ) deneyi için şunlar söylenebilir:

- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerleri artmıştır.
- C80 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerlerinde önemli değişimler



görülmemiştir. Her üç malzeme için tüm ikame oranlarında (silis dumanı %20 hariç) 11 ila 13 s arasında değerler elde edilmiştir.

- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufuna göre betonları daha viskoz yapmıştır. Silis dumanı ise viskoziteyi arttırma noktasında her iki malzemeye göre de çok daha etkili bir malzemedir.
- C30 sınıfı betonlarındaki  $T_{50}$  süreleri mineral katkı tipi ve ikame oranından oldukça etkilenirken; C80 sınıfı betonlar bu iki faktörden bağımsız bir davranış sergileyerek her tip katkı ve tüm ikame oranlarında benzer özellikler elde edilmiştir.

Geçiş yeteneğini gösteren U kutusu deneyi için şunlar söylenebilir:

- Her iki beton sınıfına ait tüm katkı tipi ve kullanım oranlarında “0” mm elde edilmemiştir. Dolayısıyla geçiş yeteneği mükemmel olan bir betondan söz etmek mümkün olmamıştır.
- Tüm betonlar Tablo 3.3’de verilmiş olan 0-30 mm kriterleri arasında kalmıştır.
- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun kullanım miktarı arttıkça geçiş yeteneğinin azaldığından bahsetmek mümkünken, silis dumanının artışıyla bu özelliğin değişmediği söylenebilir.
- C80 sınıfı betonlarda uçucu külün kullanım miktarı arttıkça C30 betonlarının aksine geçiş yeteneği artmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artışıyla ise bu özellik kayda değer bir değişiklik yaratmamıştır.
- Genel olarak C80 sınıfı betonların geçiş yeteneğinin C30 sınıfı betonlardan daha iyi olduğu söylenebilir.

Doldurma kabiliyetini gösteren V hunisi deneyi için şunlar söylenebilir:

- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile akış süreleri ve dolayısıyla viskozite özelliği artmıştır. Bu durum  $T_{50}$  sürelerindeki durumu doğrulamıştır.
- C80 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanının artması ile viskozite değerlerinde önemli değişimler görülmemiştir. Bu durum yine  $T_{50}$  sürelerindeki durumu doğrulamıştır.

- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufuna göre betonları daha viskoz yapmıştır. Silis dumanı ise viskoziteyi artırma noktasında her iki malzemeye göre de çok daha etkili bir malzemedir.
- C30 sınıfı betonlarındaki akış süreleri mineral katkı tipi ve ikame oranından oldukça etkilenirken; C80 sınıfı betonlar bu iki faktörden bağımsız bir davranış sergileyerek her tip katkı ve tüm ikame oranlarında benzer özellikler elde edilmiştir.

Geçiş yeteneğini gösteren L kutusu deneyi için şunlar söylenebilir

- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül arttıkça geçiş yeteneği artarken, granüle yüksek fırın cürufunda bu özellik kısmen gerçekleşmiştir. Silis dumanı miktarı ise geçiş yeteneği üzerinde etkili olmamıştır.
- C80 sınıfı betonlarda uçucu kül arttıkça geçiş yeteneği C30 betonlarının aksine azalmıştır. Granüle yüksek fırın cürufu ise C30 betonlarındaki gibi geçiş yeteneğini arttırmıştır. Dolayısıyla uçucu kül beton sınıfı değiştiğinde farklı davranışlar sergilerken, granüle yüksek fırın cürufunun davranışının çok etkilenmediğini söylemek mümkündür. Silis dumanına bakıldığında ise geçiş yeteneği azalmıştır.

Hava içeriği deneyi için şunlar söylenebilir:

- Her iki beton sınıfında tüm mineral katkı tiplerinde ve tüm ikame oranlarında hava içeriğinin %1,3 ve %2,1 arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum katkı tipi ve ikame oranlarının hava içeriği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermiş, dolayısıyla hava içeriğinin bu parametrelere bağlı olarak bir sistematik çerçevesinde değiştiğinden bahsetmek mümkün olmamıştır.

Basınç dayanımları için şunlar söylenebilir:

- En yüksek dayanımlar C30 ve C80 sınıfı betonlarda silis dumanı ile elde edilmiştir. Bu durum silis dumanının dünya literatüründe de bilindiği gibi çok etkili bir puzolan olmasına bağlanabilir. Diğer taraftan EN 206 standardında da diğer puzolanlara göre etkinlik katsayısının yüksek olması da bunun bir göstergesidir. Diğer taraftan silis dumanı miktarının artışı C30 için önemli bir artış sağlamamışken, C80 betonunda ~%8'lik bir artış sağlamıştır.



- C30 ve C80 sınıfı betonlarda uçucu kül miktarı arttıkça dayanımda sistematik bir şekilde azalma meydana gelmiştir. Ayrıca uçucu kül kullanımıyla C80 betonu elde edilememiştir.
- C30 ve C80 sınıfı betonlarda granüle yüksek fırın cürufu için optimum kullanım oranı % 30 olarak ortaya çıkmıştır. Her kullanım oranında C30 dayanımı elde edilirken, C80 sınıfı betonda gerekli dayanım sadece optimum oran olan %30 için elde edilebilmiştir.
- Bütün kullanım oranlarında C80 betonunu sağlayan tek malzeme silis dumanı olmuştur. Diğer malzemelerde kullanım miktarına bağlı olarak değişen ve hedeflenen değerlerin altında kalan dayanımlar elde edilmiştir.
- C30 sınıfı betonların dayanımları ortalama C35 mertebesinde elde edilmiştir. C80 sınıfı tüm betonlar patlayarak kırılmıştır.
- 56. gündeki dayanımlar 28. gündeki dayanımlara göre C30 sınıfında %25 mertebelerine; C80 sınıfında ise %20 mertebelerine kadar artış göstermiştir. Bu durum mineral katkıların puzolanik etkisinin zaman geçtikçe devam ettiğinin bir göstergesidir.

Yarmada çekme dayanımları için şunlar söylenebilir:

- En yüksek dayanımlar C30 ve C80 sınıfı betonlarda silis dumanı ile elde edilmiştir.
- C30 ve C80 sınıfı betonlarda uçucu kül miktarı arttıkça dayanımda sistematik bir şekilde azalma meydana gelmiştir.
- C30 ve C80 sınıfı betonlarda granüle yüksek fırın cürufu için basınç dayanımında olduğu gibi optimum kullanım %30 olarak belirlenmiştir.

Su işleme derinliği için şunlar söylenebilir:

- C80 sınıfı betonlarda tüm malzemeler ve tüm kullanım oranları için geçirimsizlik değerleri beklenildiği üzere C30 sınıfı betonlara göre daha düşük çıkmıştır.
- C30 sınıfı betonlarda uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunda en düşük dayanımlarda geçirgenlik de en düşük çıkmıştır. Geçirgenliğin dayanımla orantılı olacağı düşünülse de puzolanik etki daha baskın rol oynamıştır. Dayanım düşük olmasına rağmen geçirgenlik düşmüştür. Silis dumanında ise geçirgenlik basınç dayanımıyla orantılılık göstermiştir. Dayanım arttıkça

geçirgenlik azalmıştır. Ayrıca en düşük geçirgenlik değerleri silis dumanında elde edilmiştir.

- C80 sınıfı betonlarda da yine en düşük geçirgenlik değerleri silis dumanında elde edilmiştir.
- C80 sınıfı betonlarda dayanım çok yüksek olduğu için puzolanik etki net olarak görülememiştir.
- Her iki beton sınıfında da mineral katkı kullanılmayan şahit karışım en yüksek geçirimsizlik değerine sahiptir. Bu durumun, mineral katkıların geçirimsizliği sağlamak bakımından önemli bir rol üstlendiğinin kanıtı olduğunu söylemek mümkündür.

Genel olarak çalışma ile ilgili şunlar söylenebilir:

- Bu çalışmadan elde edilen veriler ilgili bölümlerde verilen malzeme özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişimlerin olması durumunda benzer sonuçların elde edilip edilmeyeceği araştırılabilir. Aksi takdirde bu malzemelerin beton üzerindeki etkisini genel yargılarla değerlendirmek mümkün olmayacaktır.
- Farklı mineral katkıları ve farklı kullanım oranlarında kendiliğinden yerleşen beton özelliklerinin nasıl değiştiği araştırılabilir.



## 7. KAYNAKLAR

ACI Education Bulletin E3-01 (2001). *Cementitious Materials for Concrete*.

ACI 233R-03 (2003). *Slag Cement in Concrete and Mortar*.

ASTM C989 – 99 (1999). *Standard Specification for GGBFS for use in Concrete and Mortar*.

Bernabeu, M. (2000). *Brite Euram Project: Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete-FINAL REPORT: TASK 7 Form-system and surface quality*. GTM Construction, 1-83.

Bury, M.A. and Bühler, E. (2002). Methods and Techniques for Placing Self-Consolidating Concrete – An overview of Field Experiences in North American Applications. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 281-286.

Bury, M.A. and Christensen, B.J. (2002). The Role of Innovative Chemical Admixtures in Producing Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 141-146.

Colleparidi, M. (2001). A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC). unpublished data, 10p.

Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R. and Torresan I. (2002). Zero Energy System: An Innovative Approach for Rationalized Precast Concrete Production. *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, Istanbul, 1-8.

Courard, L., Darimont, A., Willem, X., Geers, C. And Degeimbre, R. (2002). Repairing Concretes with Self Compacting Concrete: Testing Methodology Assessment. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 267-274.

Daczko, J.A. (2002). Stability of Self-Consolidating Concrete, Assumed or Ensured? *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 245-252.

Dehn, F. (2002). High Performance Self-Compacting Concretes for Bridge Construction. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 433-438.

Dowson, A.J. (2002). The application, self-compacting concrete (SCC) in precast products. *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, Istanbul, 8pp.

EFNARC (2002). Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *EFNARC*.

Erdoğan, T.Y. (2003). *Beton*. METU Press, Ankara.

Erdoğan, T. Y. (2004). *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*. THBB Yayınları.

Felekoğlu, B. (2003). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Malzemesi ABD*, İzmir.

Fornasier, G. and Giovambattista, Z. L. (2002). Self-Consolidating Concrete in Argentina: Development Program and Applications. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 439-444.

Hughes, J.J. (2002). Evaluation of Self-Consolidating Concrete – Summary Report, *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 287-294.



Kawai, T. (1987) Non Disperseble Underwater Concrete Using Poliyomers, Marine Concrete. *Int. Congress of Polymer Conc*, 1-6.

Khayat, K.H. and Morin, R. (2002). Performance of Self-Consolidating Concrete Used to Repair Parapet Wall in Montreal. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 475-481.

Khayat, K.H., Assaad, J. and Mesbah, H. (2002). Variations of Formwork Pressure of Self-Consolidating Concrete – Effect of Section Width and Casting Rate. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 295-302.

Martin, D.J. (2002). Economic Impact of SCC in Precast Applications. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 153-158.

Okamura, H. and Ouchi, M. (1998). Self-compacting high performance concrete. *Progress in Structural Enginering and Materials.*, 4, 378-383.

Okamura, H. and Ouchi, M. (1999). Self-compacting concrete: Development, present use and future. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*, (eds: A.Skarendahl and Ö. Petersson), 3-14.

Osterberg, T. (2002). The Use of SCC in the Sodri Lanken Project. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 445-450.

Özkul, M.H., Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, A., Mutlu M, and Manzak, O. (2002). The Usage of Self Compacting Concrete in the Precast Industry. *17<sup>th</sup> Int. Congress of Precast Concrete Industry*, İstanbul.

Özkul, H. (2013). Kendiliğinden Yerleşen Betonlar. *Beton Kongresi*, İstanbul, 76-95.

Özkul, H., Işık, İ., Sağlam, A.R. ve Parlak, N. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Viskozite Düzenleyici Katkı Kullanımı. *6. Beton Kongresi*, 16-18 Kasım İTÜ, İstanbul, 421-437.

Pielkenrood, A.P. (2002). SCC Will Boost Profits. *BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry*, Istanbul, 5p.

Sağlık, A. (2009). Beton ve Kimyasal Katkı Teknolojisinde Yeni Gelişmeler ve Standartlar. [online]. (12 ekim 2013), <http://atilimlab.com.tr/makaleler/Betonve.pdf>

Semioli, W.J. (2002). Self Placing Concrete. *Concrete International*, 23, 69-72.

Siddique, R. K, and Mohammad, I. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer.

Tokay, M. ve Erdoğan, K. (2011). *Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar*. TÇMB Yayınları.

Turcry, P., Loukili, A. and Haidar, K. (2002). Mechanical Properties, Plastic Shrinkage and Free Deformations of Self-Consolidating Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 335-340.

Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2004). *Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*. TÇMB Yayınları.

Tviksta, L.-G. (2000). *Brite Euram Project: Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete-FINAL REPORT: TASK 8.4 Quality control*. NCC AB, 1-28.

Walraven, J. (2002). Self-Compacting Concrete in the Netherlands. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, 399-404.

Yeğınobalı A. (2009), "Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı", TÇMB