

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENTETİK C-S-H BİLEŞİKLERİNİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN  
BETONLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa Oğuz SAF**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN**

**Mayıs 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENTETİK C-S-H BİLEŞİKLERİNİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN  
BETONLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mustafa Oğuz SAF  
501921035**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ünal Anıl DOĞAN**

**Mayıs 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501921035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mustafa Oğuz SAF**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SENTETİK C-S-H BİLEŞİKLERİNİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ** ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Yrd.Doç.Dr.Ünal Anıl DOĞAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri      :**      **Doç.Dr.Hakan Nuri ATAHAN**      .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd.Doç.Dr. Özgür ÇAKIR**      .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **04 Mayıs 2015**  
**Savunma Tarihi :**      **02 Ekim 2015**



*Eşim Gül ve aileme,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmamı sürdürdüğüm dönemde, daima güler yüzlülüğüyle bana destek olan, çalışma disiplini sağlayan, gösterdiği büyük sabrı, öneri, eleştiri ve düzenlemeleriyle çalışmanın gerçekleşmesine büyük katkıda bulunan tez danışmanım saygıdeğer hocam, sayın Yrd.Doç.Ünal Anıl DOĞAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasına verdikleri destekten dolayı Nuh Beton firmasından sayın Elif BAŞARANER'e ve Boğaziçi Beton firmasından sayın Lutfiye KOCABIYIK'a ,BASF Yapı Kimyasalları firmasından sayın Osman TEZEL ve sayın İsmail ÇİL'e teşekkür ederim.

Ayrıca laboratuvar çalışmalarımda,sonsuz enerjisiyle bana yardımcı olan dostum Hasan FİLİZFİDANOĞLU 'na da teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2015

Mustafa Oğuz SAF  
İnşaat Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                          |      |
|--------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                               | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                        | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                        | xi   |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....                                                     | xiii |
| ÖZET.....                                                                | xvii |
| SUMMARY .....                                                            | xxi  |
| 1. GİRİŞ .....                                                           | 1    |
| 1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton .....                                   | 5    |
| 1.1.1 Kendiliğinden yerleşen betonun tanımı .....                        | 5    |
| 1.1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun tarihçesi .....                     | 5    |
| 1.1.3 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları ve dezavantajları ..... | 6    |
| 1.1.3.1 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları.....                  | 6    |
| 1.1.3.2 Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları .....              | 6    |
| 1.1.4 Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları .....             | 7    |
| 1.2 Kendiliğinden Yerleşen Beton Özellikleri .....                       | 8    |
| 1.2.1 Tasarım yöntemleri .....                                           | 8    |
| 1.2.2 KYB bileşenleri.....                                               | 13   |
| 1.2.2.1 Çimento .....                                                    | 13   |
| 1.2.2.2 Agregası .....                                                   | 15   |
| 1.2.2.3 İnce (toz) madde.....                                            | 16   |
| Uçucu kül .....                                                          | 17   |
| Silis dumanı.....                                                        | 19   |
| Atık mermer tozları (AMT) .....                                          | 19   |
| Yüksek fırın cürufu .....                                                | 20   |
| 1.2.2.4 Akışkanlaştırıcı katkı .....                                     | 22   |
| 1.2.3 Taze hal özellikleri.....                                          | 23   |
| 1.2.3.1 Doldurma yeteneği .....                                          | 23   |
| 1.2.3.2 Ayırışmaya karşı direnç .....                                    | 24   |
| 1.2.3.3 Geçiş yeteneği .....                                             | 24   |
| 1.2.4 Sertleşmiş hal özellikleri.....                                    | 24   |
| 1.2.4.1 Basınç dayanımı .....                                            | 25   |
| 1.2.4.2 Erken dayanım kazanma hızı .....                                 | 25   |
| Priz hızlandırıcı katkıları .....                                        | 25   |
| Alüminat esaslı hızlandırıcılar .....                                    | 27   |
| Sentetik C-S-H .....                                                     | 27   |
| 1.2.4.3 Boşluk yapısı.....                                               | 28   |
| 1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Yöntemleri.....                   | 29   |
| 1.3.1 Yayılma deneyi .....                                               | 30   |
| 1.3.2 V hunisi deneyi .....                                              | 32   |
| 1.3.3 L kutusu deneyi .....                                              | 33   |
| 1.3.4 J halkası deneyi .....                                             | 33   |

|                                                      |           |
|------------------------------------------------------|-----------|
| 1.3.5 Kısıtlanmış çökme-yayılma deneyi .....         | 34        |
| 1.3.6 Elek ayrışma deneyi .....                      | 35        |
| 1.3.7 Daldırma deneyi .....                          | 35        |
| 1.3.8 Reoloji deneyi .....                           | 36        |
| <b>2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>                   | <b>37</b> |
| 2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri .....       | 37        |
| 2.1.1 Çimento .....                                  | 37        |
| 2.1.2 Agregası .....                                 | 38        |
| 2.1.3 Yüksek fırın cürufu .....                      | 39        |
| 2.1.4 Akışkanlaştırıcı katkı.....                    | 39        |
| 2.1.5 Su.....                                        | 40        |
| 2.1.6 Sentetik C-S-H .....                           | 40        |
| 2.2 Beton Karışımları .....                          | 40        |
| 2.3 Deneylerin Yapılışı.....                         | 41        |
| 2.3.1 Taze beton deneyleri .....                     | 45        |
| 2.3.1.1 Yayılma deneyi ve t50 süresinin ölçümü ..... | 45        |
| 2.3.1.2 V hunisi akış süresi ölçümü .....            | 46        |
| 2.3.1.3 Elekte ayrışma deneyi .....                  | 47        |
| 2.3.1.4 Hava miktarı deneyi .....                    | 47        |
| 2.3.1.5 Birim ağırlık deneyi .....                   | 48        |
| 2.3.1.6 Viskometre deneyi.....                       | 48        |
| 2.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri .....               | 49        |
| 2.3.2.1 Basınç dayanımı deneyi .....                 | 49        |
| 2.3.2.2 Kılcallık deneyi .....                       | 50        |
| <b>3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER.....</b>   | <b>53</b> |
| 3.1 Taze Beton Deney Sonuçları .....                 | 53        |
| 3.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları .....           | 56        |
| 3.2.1 Eksenel basınç dayanımı deney sonuçları .....  | 56        |
| 3.2.2 Kılcallık deneyi sonuçları.....                | 61        |
| <b>4. SONUÇLAR .....</b>                             | <b>63</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                | <b>65</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                    | <b>71</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                 | <b>75</b> |

## **KISALTMALAR**

|              |                                              |
|--------------|----------------------------------------------|
| <b>ASTM</b>  | : American Society for Testing and Materials |
| <b>CH</b>    | : Serbest Kireç $\text{Ca(OH)}_2$            |
| <b>C-S-H</b> | : Kalsiyum Silikat Hidrat                    |
| <b>KYB</b>   | : Kendiliğinden Yerleşen Beton               |
| <b>YFC</b>   | : Yüksek Fırın Cürufu                        |



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1 : EFNARC KYB Tasarım yaklaşımı .....                                                              | 10 |
| Çizelge 1.2 : EFNARC'a (2002) göre tavsiye edilen KYB deneyleri sınır değerleri 10                            |    |
| Çizelge 1.3 : Sınır değer üstündeki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu .....            | 11 |
| Çizelge 1.4 : Sınır değerlerin altındaki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki ..... takip tablosu. .... | 11 |
| Çizelge 1.5 : Problemlerin çözümüne yönelik yapılması gerekenler (Felekoğlu,2003) .....                       | 12 |
| Çizelge 1.6 : Değişik uygulamalar için kıvam parametreleri .....                                              | 13 |
| Çizelge 1.7 : ASTM 'ye göre çimento tipleri ve anabileşen miktarları .....                                    | 14 |
| Çizelge 1.8 : EFNARC'a göre deney yöntemleri ve özellikleri .....                                             | 30 |
| Çizelge 2.1 : P.Ç CEM I R 42, 5 çimentonun özellikleri .....                                                  | 37 |
| Çizelge 2.2 : Kullanılan agregaların özellikleri ve elek analiz sonuçları .....                               | 38 |
| Çizelge 2.3 : YFC nin analiz sonuçları .....                                                                  | 39 |
| Çizelge 2.4 : Glenium SKY 608 teknik özellikleri .....                                                        | 39 |
| Çizelge 2.5 : X-SEED 100 'ün teknik özellikleri .....                                                         | 40 |
| Çizelge 2.6 : Karışımlara ait malzeme miktarı .....                                                           | 41 |
| Çizelge 2.7 : Taze ve sertleşmiş beton deneyleri .....                                                        | 41 |
| Çizelge 2.8 : Deneysel çalışmada kullanılan örnek tipi, boyutları ve sayıları .....                           | 42 |
| Çizelge 3.1 : Karışımların taze beton deney sonuçları .....                                                   | 53 |
| Çizelge 3.2 : Karışımların basınç deney sonuçları .....                                                       | 57 |
| Çizelge 3.3 : Kılcalık katsayıları .....                                                                      | 61 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|              |                                                                                                                                                                                |    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1:   | KYB’da bileşenlerin beton özelliklerine etkileri.....                                                                                                                          | 8  |
| Şekil 1.2:   | Beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkisi.....                                                                                                                          | 9  |
| Şekil 1.3:   | Saf çimento hamurunun (A), nanosilika ihtiva eden çimento .....<br>hamurunun (B) ve sentetik C-S-H ihtiva eden çimento .....<br>hamurunun (C) şematik hidrasyon gelişimi ..... | 28 |
| Şekil 1.4:   | Fransız standartı P18-503’e göre yüzey boşluk yapısı.....                                                                                                                      | 29 |
| Şekil 1.5:   | Yayılma tablası ve hunisi boyutları.....                                                                                                                                       | 30 |
| Şekil 1.6:   | KYB’da çökme-yayılma deneyi.....                                                                                                                                               | 31 |
| Şekil 1.7:   | V-hunisi boyutları ve fotoğrafı.....                                                                                                                                           | 32 |
| Şekil 1.8:   | L-kutusu deney aleti şematik gösterimi .....                                                                                                                                   | 33 |
| Şekil 1.9:   | J halkası deney aleti.....                                                                                                                                                     | 34 |
| Şekil 1.10:  | Engelli yayılma deneyi aleti (Özkul vd, 2006).....                                                                                                                             | 34 |
| Şekil 1.11:  | Elek ayırma deney aleti.....                                                                                                                                                   | 35 |
| Şekil 1.12:  | Daldırma deney aleti .....                                                                                                                                                     | 35 |
| Şekil 1.13:  | Akma sınırı ve Plastik Viskozite arasındaki ilişki .....                                                                                                                       | 36 |
| Şekil 2.1:   | Agrega karışımlarının granülometri eğrisi .....                                                                                                                                | 38 |
| Şekil 2.2:   | Beton mikseri .....                                                                                                                                                            | 43 |
| Şekil 2.3:   | 10x10x10 cm lik çelik kalıplar.....                                                                                                                                            | 44 |
| Şekil 2.4:   | Kür havuzları.....                                                                                                                                                             | 44 |
| Şekil 2.5:   | Çökme yayılma konisi ve tablası.....                                                                                                                                           | 45 |
| Şekil 2.6:   | V hunisi deneyi.....                                                                                                                                                           | 46 |
| Şekil 2.7:   | Havametre aleti.....                                                                                                                                                           | 48 |
| Şekil 2.8:   | Viskometre aleti .....                                                                                                                                                         | 49 |
| Şekil 2.9:   | Basınç deneyi aleti.....                                                                                                                                                       | 50 |
| Şekil 3.1 :  | 1. ve 2.grup karışımın viskometre sonuç grafiği .....                                                                                                                          | 54 |
| Şekil 3.2 :  | 3. ve 4.grup karışımın viskometre sonuç grafiği .....                                                                                                                          | 55 |
| Şekil 3.3 :  | 5. ve 6.grup karışımın viskometre sonuç grafiği .....                                                                                                                          | 55 |
| Şekil 3.4 :  | 7. ve 8.grup viskozite deney sonuç grafiği.....                                                                                                                                | 55 |
| Şekil 3.5 :  | Tüm grupların kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği.....                                                                                                                          | 56 |
| Şekil 3.6 :  | 8°C su küründeki 1, 2,3 ve 4. grup numunelerin basınç dayanım<br>grafikleri.....                                                                                               | 58 |
| Şekil 3.7 :  | 8°C su küründeki 5,6,7 ve 8..grup numunelerin basınç dayanım<br>grafikleri.....                                                                                                | 59 |
| Şekil 3.8 :  | 20°C su küründeki 1,2,3 ve 4.grup numunelerinin basınç dayanım<br>grafikleri.....                                                                                              | 59 |
| Şekil 3.9 :  | 20°C su küründeki 5,6,7 ve 8.grup numunelerinin basınç dayanım<br>grafikleri.....                                                                                              | 60 |
| Şekil 3.10 : | 8°C de suda kürlenmiş tüm grupların basınç dayanım grafiği .....                                                                                                               | 60 |
| Şekil 3.11 : | 20°C de suda kürlenmiş tüm grupların basınç dayanım grafiği .....                                                                                                              | 61 |
| Şekil A.1:   | 1.grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik.....                                                                                                              | 70 |
| Şekil A.2:   | 2. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik.....                                                                                                             | 70 |
| Şekil A.3:   | 3. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik.....                                                                                                             | 71 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil A.4:</b> 4. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik..... | 71 |
| <b>Şekil A.5:</b> 5. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik..... | 72 |
| <b>Şekil A.6:</b> 6. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik..... | 72 |
| <b>Şekil A.7:</b> 7. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik..... | 73 |
| <b>Şekil A.8:</b> 8. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik..... | 73 |

## **SENTETİK C-S-H BİLEŞİKLERİNİN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN TAZE VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

### **ÖZET**

Dünyada inşaat sektörünün gelişmesiyle; daha yüksek ve özellikli yapıların dizayn edilmesi, prefabrik elemanların inşaat sektörünün içinde daha fazla yer alması, özel mimari detayların projelerde öne çıkması ve imalat hızının giderek önem kazanması gibi faktörler , özel betonlar üretmeyi de zorunlu hale getirmiştir

1987 yıllarının başlarında ilk kez Tokyo Üniversitesinde üretilen kendiliğinden yerleşen beton(KYB) kendi ağırlığı altında hiçbir dış etki uygulanmadan (vibrasyon, sarsma vb.) istenilen yere kolayca yerleşebilen ve homojen bir şekilde yayılan özel bir betondur. KYB akıcı kıvamı ve ayrışmaya karşı yüksek direnciyle sık donatılı ve dar kesitli yapı elemanlarında kolayca yerleşme özelliği sayesinde, şantiyelerde işlenebilirlikten doğan işçilik kusurlarını da en aza indirmektedir

KYB'nin akıcı kıvamlı bir beton olmasından dolayı bu tür betonların taze hal ve reolojik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Taze hal özelliklerinde meydana gelebilecek bir olumsuzluk KYB'nin mekanik ve durabilite özelliklerini de olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, KYB'nin kendiliğinden yerleşebilirlik mekanizmasının bilinmesi iyi bir tasarım yapmak için oldukça önemlidir. Kendiliğinden yerleşebilirlik için hem betonun harç fazının yüksek akıcılıkta olması hem de harç fazının iri agregası ile ayrışmadan donatılar arasından akması ve kalıplara yerleşmesi gerekmektedir. Bu mekanizmanın gerçekleşmesi için üç temel kriter belirlenmiştir. Bunlar; maximum agregası çapının sınırlanması, su/toz oranının düşük olması ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmasıdır. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıları KYB için temel bileşenlerden bir tanesi konumundadır.KYB lerin içeriğinde olması gereken yüksek dozadaki ince malzemenin önemli bir kısmı , puzolanik özelliği keşfedildiğinden, sanayi atığı olan YFC ile ikame edilerek, hem maliyetin düşürülmesi hem de doğaya verilecek zararların azaltılması sağlanmaktadır.

Günümüzde zaman en önemli parametredir. İnşaat imalatları ve beton dökümleri sonucunda bir sonraki aşamaya geçebilmek için, betonun yeterli dayanıma ulaşmasını beklemek gerekmektedir..Bu bekleme süresinin azaltılabilmesi, bağlayıcı malzemenin hidrasyonunu hızlandırılmasıyla mümkündür.Çimento ve özellikle puzolanik özellikli bağlayıcıların sıcaklıkla hidrasyon süreleri çok ilintilidir. Sıcak havalarda (20-30)°C lerde dökülen betonların hidrasyon hızı 5-10°Clerde dökülenlere göre çok daha fazladır.Bu yüzden soğuk havalarda dökülen betonlara, bazı ilave önlemler almak gerekmektedir.(sıcak buhar kürü yapmak kalıba sıcaklık uygulamak, priz hızlandırıcı katkıları kullanmak gibi) . Tabi bu yöntemlerin bir kısmı zahmetli bir kısmı da betonun bazı özelliklerine zarar verici nitelikte olabilmektedir.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda çimento hidrasyonunu hızlandırmak için bir hidrasyon ürünü olan C-S-H bileşiklerinin, sentetik olarak elde edilmiş C-S-H nanopartiküllerden de faydalanılmaktadır. Bu yöntemle, normal şartlarda kristal

gelişimi için gerekli ama zaman kaybına sebep olan çekirdeklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, çimento hidratasyonunun ölü evresi kısalmaktadır.

Nanopartikül ilavesiyle hidratasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan bu yöntemde, hidratasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde, çimento taneleri arasında da oluşmaktadır. Sonrasında çimento hidratasyon ürünleri bu çekirdekler sayesinde kristal büyüme mekanizmasıyla oluşur. Nanopartiküllerin ilavesi sayesinde, hidratasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında da oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha boşluksuz, erken yaşta yüksek basınç mukavemetine sahip çimento esaslı malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir.

Bu tez çalışmasında KYB lerde maliyeti düşürmek amacıyla kullanılan YFC nin soğuk havalarda çok yavaş hidrate olmasından kaynaklanan olumsuz özelliğinin sentetik C-S-H kullanımı ile düzeltilmesi amaçlanarak , KYB nin taze ve sertleşmiş özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Bu labaratuvar çalışmasında 8°C ortam sıcaklığında, su miktarı 185 lt olarak sabit olmak üzere 500 kg/m<sup>3</sup> çimento içeren referans betonu üretilmiş ,daha sonra çimentonun ağırlıkça yüzde 40' ı eksiltilecek yerine sırasıyla 1: 1 ,1:1,25 ve 1:1,5 oranlarında YFC ikame edilerek 4 farklı KYB hazırlanmış ve bu karışımlara ayrıca ince malzemenin % 2 si oranında sentetik C-S-H ilave edilerek 4 farklı karışım daha hazırlanmış ve bu 8 karışıma KYB taze hal deneyleri uygulandıktan sonra 10x10x10 cm lik küp numuneler alınmıştır. Tüm karışımların 70± cm yayılmaya standartlarda öngörülen süreler içinde ulaştığı ,YFC katkısının yayılma çapını arttırdığı görülmüştür. Kalıplar yaklaşık 9 saat sonra söküldükten sonra numunelerin yarısı 8 derecedeki su havuzuna diğer yarısı da 20 derecedeki su havuzuna koyulmuştur. İki farklı sıcaklıkta kürlenene numunelere 9saatlik,1 günlük,3 günlük,7 günlük,28 günlük ve 90 günlük basınç testleri uygulanmıştır.8°Cdeki suyla dolu olan havuzun su sıcaklığı düzenli olarak ölçülmüş gerektiğinde buz kalıbı ilavesiyle sabit sıcaklıkta olması sağlanmıştır.

Ayrıca üretilen 8 farklı karışımın taze haldeyken, reometre cihazında dönme hızına karşı ölçülen moment değerlerinden hareketle 15 er dakika aralıklarla viskozite katsayıları tespit edilmiş ve toplam 1 saat sonucunda viskozite katsayılarındaki değişimler tespit edilerek kıvam kaybı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bütün yapılan deneyler sonucunda 8°C de kürlenene numunelerde özellikle 1,3,7 günlük basınç mukavemetleri incelendiği zaman sentetik C-S-H katkılı olan numunelerin tamamında katkısız olanlara göre daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.Ancak 20°Cde kürlenene numuneler kıyaslandığı zaman 3.günden sonra sentetik C-S-H katkılı ve katkısız numunelerin yaklaşık kendi gruplarında aynı değerleri yakaladığı gözlenmiştir.Ayrıca sentetik C-S-H katılmasının ilerki yaşlarda beton performansına olumsuz etkisi de olmamıştır.Bir önemli tespitte, özellikle YFC katkılı KYB lerde kendi grupları içinde (28 gün dahil) 8°C de kürlenene numunelerin dayanımları ,aynı numunelerin 20°C de kürlenenelelerinden daha düşük dayanımda kalmış olmalarıdır.Bu da YFC nin puzolanik etkisinin yüksek sıcaklıkta daha iyi olduğunu göstermektedir.Sentetik C-S-H katılan beton numunelerinde özellikle 8°C de kürlenene numunelerde YFC nin soğuk hava koşullarındaki olumsuz özelliğinin büyük ölçüde giderildiği anlaşılmış olup en azından daha erken zamanlarda kalıp sökümünün mümkün olabileceği kanaatine varılmıştır.

Reometre cihazıyla yapılan deneylerde her bir karışıma 15' er dakika arayla bir saat boyunca uygulanan deneyde kendi gruplarında viskozite katsayılarında kayda değer bir değişim tespit edilmemiştir. Ancak sabit su miktarına karşılık YFC miktarının artması kayma eşiklerinde ve viskozite katsayılarında artışa sebep olmuştur. Yapılan kılcallık deneyleri sonucunda YFC ikame oranlarının artmasıyla kılcallık katsayısının düştüğü, YFC ve sentetik C-S-H ın aynı anda kullanılmasının ise kılcallık katsayısını dahada düşürdüğü gözlenmiştir.

Sonuç olarak mineral katkı olarak YFC kullanılarak üretilen KYB lerin soğuk iklim şartlarında üretilmesi gerektiği hallerde sentetik C-S-H bileşiklerini betona katılmasının düşük sıcaklık etkilerinin olumsuz özelliklerini azaltarak beton performansına olumlu katkıda bulunduğu söylenebilir.



## **EFFECT OF SYNTHETIC C-S-H COMPOUNDS ON FRESH AND HARDENED PROPERTIES OF SELF COMPACTING CONCRETE**

### **SUMMARY**

With the development of the building construction in the world, the sector now designs higher and more specialized buildings, uses prefabricated buildings within the sector more often, highlights architectural details in projects and enjoys a higher pace of productivity, which made it essential to manufacture special kinds of concrete.

Self-compacting concrete (SCC), which was first developed in the Tokyo University in the beginning of 1987, is a special type of concrete which spreads homogenously and settles into the desired area without any external force (vibration, jolting etc.) but its own weight. SCC also minimizes the risk of workmanship defects born out of the machinability on the worksite with the help of its fluid consistency, its high weathering resistance and its ability to easily settle in the densely packed and narrow section of structural elements.

As SCC is a fluid concrete, it is essential to know their rheological and fresh state properties. A negativity that could occur in fresh state properties would affect the SCC's mechanical and durability properties negatively as well. That is why is it important to know SCC's self-compacting mechanism well while creating a good design. For self-compactability, the mortar phase of the concrete should be highly fluid and it should flow through reinforcements without decomposing with the coarse aggregate. Three criteria have been identified for the occurrence of this mechanism. These are: the limiting of the maximum aggregate diameter, a low water/dirt ratio and the use of fluidizing additives. Superfluidizing chemical additives are one of the main components for SCC. An important part of the high dosage fine material that is supposed to be in SCC matter has been replaced by blast furnace slag (BFS), which is an industrial waste material, since its pozzolanic property has been discovered, in order to decrease costs and minimize environmental damage.

In today's world, time is the most important parameter. In order to get to the next step after construction production and concreting, it is necessary to wait for the concrete to reach the proper strength. It is possible to reduce this waiting time by hydrating the binding material. The temperature and hydration time of the concrete and the pozzolanic binding materials are highly related. The hydration time of concrete poured in warm temperatures (20-30) is a lot faster compared to concrete poured in 5-10 degrees. That is why it is necessary to take some extra precautions for concrete poured in cold weather, such as a hot steam cure, heating the mold or using accelerating additives. Of course, some of these methods can be laborious, whereas some could harm some properties of the concrete.

Studies done in recent years use the C-S-H nanoparticles synthetically acquired from C-S-H compounds, which is a hydration product, in order to accelerate concrete hydration. With this method, nucleation reaction, which are required under normal circumstances for crystal growth, become unnecessary and the dead stage of concrete hydration is shortened. With this method where hydration kinetics are improved with

nanoparticul additions, we see that the nuclei of the hydration products are not only formed on and between concrete parts but also on the nanoparticules. Later on, hydration units form with a crystal growth mechanism with the help of these nuclei. Thanks to the nanoparticule addition, hydration units will start to form between concrete pieces as well, therefore the formation of closely-graded microstructures will occur shortly, compared to a reference mixture without nanoparticules. This way it is possible to acquire more closely-graded concrete-based material with high compressive strength at early ages.

In this dissertation we have analyzed the affects of the usage of C-S-H compounds as an alternative to use blast furnace slag (BFS) commonly used to correct the negative affects of slow hydration in cold weather and their effects on SCC's fresh and solid properties.

This lab study has been conducted in 8 degrees of ambient temperature. Firstly, the amount of water fully meeting the requirements have been identified as 185 lt and 500 dosages of cement binding reference cement has been produced. Then, 40% of the cement was subtracted, and 4 different SCC's have been prepared, substituting them with BFS at the rates of 1:1, 1:1.25, 1:1.5 respectively. To these mixtures, 2% of synthetic C-S-H was added on top of the fine material. Four additional mixtures were prepared, and after conducting SCC fresh state experiments on all these 8 mixtures, they were put in 10x10x10 cm steel forms. We observed that all mixtures achieved a 65 cm spread within the standard time time frame, and that the BFS addition increased the spread diameter. After the forms have been disassembled after 9 hours, half of the samples were put into a 8 degree water pool, while the others were put into a 20 degree water pool. The sample cured in two different temperatures underwent pressure tests that lasted for 9-hours, 1-day, 3-days, 7-days, 28-days and 90-days, respectively. The 8-degree-cold water pool's water temperature was regularly measured and ice was added when needed in order to keep a fixed temperature.

Also, the viscosity coefficient was identified with the measured torque value corresponding to the rotational speed of a reometer device with 5 min intervals when the 8 mixtures were in a fresh state and after a total 1 hour, the differences in the viscosity coefficient were observed in order to identify viscosity loss.

The results of all the experiments showed higher pressure resistance in the 8-degree -cured samples, especially when analyzing the pressure strength of the 1, 3 and 7 day long experiments. All of the synthetic C-S-H added samples showed better pressure resistance when compared to the ones without additives. However the 20-degree-cured samples showed that after the 3<sup>rd</sup> day, all samples, with or without synthetic C-S-H additives, caught up to the same rates of their own groups. Additionally we can say that there has been no negative effect on the cement at advanced age when added synthetic C-S-H compounds. Another important fact is that especially BFS added SCCs showed within their own groups (including the 28-day-group) that 8-degree-cured samples had lower resistance compared to the 20-degree-cured samples. This shows that BFS's puzzolanic effect is better on higher temperatures. In samples with synthetic C-S-H additives we see that, especially in the 8 degree cured samples, the negative effects of cold weather conditions were substantially fixed and that form disassembly could be done earlier.

Experiments done with the reometer device, which have been done for an hour with 15 min intervals, showed no significance difference in the viscosity coefficient of the

samples within the same group. However corresponding to the fixed amount of water, the increase of BFS has caused an increase in the shear stress threshold and the viscosity coefficient.

It has been observed that synthetic C-S-H additives slightly decreased the viscosity coefficients.

The results of capillarity tests showd that by increasing BFS substitution rates the capillarity decreased and that by using both BFS and synthetic C-S-H additives decreased capillarity even more.

To sum up, SCCs where BFS are used as mineral additions benefit from synthetic C-S-H compounds added into the concrete, when SCC has to be manufactured in cold weather conditions, as these help reduce the negative effects of low temperature and positively affect concrete performance.



## 1. GİRİŞ

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı altında hiçbir dış etki uygulanmadan (vibrasyon, sarsma vb.) istenilen yere kolayca yerleşebilen ve homojen bir şekilde yayılan özel bir betondur. KYB akıcı kıvamı ve ayrışmaya karşı yüksek direnciyle sık donatılı ve dar kesitli yapı elemanlarında kolayca yerleşme özelliği sayesinde, şantiyelerde işlenebilirlikten doğan işçilik kusurlarını da en aza indirmektedir.

Geleneksel beton üretiminde agrega hacmi, toplam beton hacminin %75-80'lerine ulaşmaktadır. Uygun tane boyut dağılımındaki agregalar kullanılarak kompasitenin mümkün olduğunca artırılması hedeflenmektedir. Böylece hem çimento hamurundan tasarruf edilmekte hem de agreganın yüksek mekanik özelliklerinden daha verimli bir şekilde yararlanılabilmektedir (Özturan & Çeçen, 1997).

Ancak kendiliğinden yerleşen betonda (KYB), yüksek akış kabiliyetinin sağlanması amacıyla agrega hacmi azaltılmıştır. Dolayısıyla hamur hacmi de farklı toz maddelerin ilavesi ile arttırılmaktadır. Bu durumda agregaların birbirine temas ederek sıkışma olasılığı azalmaktadır (Khayat, 1999). Akıcılığı kontrol eden parametre hamur fazının viskozitesi olup, akış sırasında agrega hamur fazı içinde sürüklenen katı tanecikler olarak kabul edilmektedir (Koehler & Fowler, 2003).

KYB'de kullanılan agrega hacmine ve hamur fazının viskozitesine bağlı olarak agrega özelliklerinin reolojik davranışa etkileri, (Geiker vd, 2002) tarafından kapsamlı deneysel çalışmalarla incelenmiştir. Bu çalışmalarda agrega özelliklerine bağlı olarak bazı yaklaşımlar ve kabuller yapılarak en uygun hamur fazı hacmi hesaplanmış ve farklı agregalar farklı hamur hacimlerinde karşılaştırılmıştır. Agreganın en büyük tane boyutu, boyut dağılımı ve tane şekli gibi özelliklerin taze KYB'nin eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite gibi reolojik parametrelerine etkileri deney sonuçları ışığında tartışılmıştır. Yazarlara göre hamur fazının dolayısıyla agrega hacminin toplam hacme oranı agregaların reolojik davranışa etkisini kontrol etmektedir.

Beton üretimi sırasında, akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmadan önce betonun işlenebilirliği yüksek su/çimento oranı ile sağlanmaya çalışılmış, bu durum betonun kalitesini olumsuz etkilemiştir. Günümüz beton teknolojisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımı işlenebilirlik açısından sağladığı kolaylıklarla bir zorunluluk haline gelmiştir.

1970'li yıllarda süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılarak düşük su/çimento oranında betonun işlenebilirliğini arttıran tasarımlar yapılmıştır. 1986 yılında Tokyo Üniversitesi'nde Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından kendiliğinden yayılabilen ve sıkışan beton üzerinde araştırmalar yapılmaya başlanmış ve böylece KYB tasarıma yönelik ilk adımlar Japonya'da atılmıştır. KYB 1990'lı yıllarda Avrupa'da da kullanılmaya başlanmıştır (Okamura & Ouchi, 1999).

Geleneksel betonda akışkanlık su ile sağlanmaya çalışıldığında sadece kayma eşiği düşmemekte, aynı zamanda viskozite de azalmaktadır. Viskozitenin düşmesi ise ayrışmaya yol açmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı geleneksel betonda viskoziteyi değiştirmeden kayma eşiğini azaltmaktadır. Silis dumanı kayma eşiğini artırırken (viskoziteyi etkilemeden) hava sürüklemeye kayma eşiğini düşürmektedir. Diğer mineral katkıların etkisi ise kayma eşiğini azaltırken viskoziteyi artırıcı ya da azaltıcı yönde olabilmektedir.

KYB kendi ağırlığı altında ve vibrasyon gerektirmeden kalıpları boşluksuz bir şekilde doldurabilmesi için yüksek akıcılığa sahip olması gerekir. Betona akıcılık özelliğini süperakışkanlaştırıcı sağlamaktadır. Ancak yüksek akıcılığı sağlarken ayrışmaya izin verilmemelidir. Ayrışma, taşıma, döküm ve yerleştirme aşamalarında, ayrıca beton katılaşana kadar iri-ince malzeme ayrılması, ya da su kusması (terleme) şeklinde görülmektedir.

Betonun kolayca şekil değiştirebilmesi için akma eşiğinin küçük olması gerekir. Bu özelliğin su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun kararlılığı bozulmakta, yani ayrışma eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle ayrışmanın göstergesi olan viskozite özelliği çok küçülmemelidir. İşte yüksek akıcılık üstün akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar (süperakışkanlaştırıcılar) yardımı ile sağlanırken betonun kararlılığı ince malzeme miktarını yüksek tutmakla ve/veya viskozite artırıcı maddeler kullanarak gerçekleşmektedir. Viskozite ile kayma eşiği arasında bir denge bulunmalıdır. Viskozite çok yüksek olduğu zaman çökme konisi kaldırıldığında betonun hareketi zorlaşmaktadır, bunun önüne geçilebilmesi için kayma eşiğinin çok düşük değerde olması gerekir.

Bu durumda betonda ayrışma eğilimini yüksek viskozite önleyecektir ve yüksek yayılmalara ulaşılır. Orta düzeyde viskozitede betonun hareketi sağlanırken orta düzeydeki kayma eşiği de aşılabılır. Bu betonlarda kayma eşiği ve viskozite birlikte ayrışmayı önler. Viskozitenin çok düşük olduğu betonlarda ise ayrışmayı önleme tek başına akma eşiğine kalır ve bu betonlarda yayılma daha düşük olacaktır (Nielsson & Wallevik, 2003).

KYB'un sadece doldurma özelliğine (doldurma yeteneği) sahip olması yetmemekte aynı zamanda yoğun donatılar arasından kolayca geçebilir özellikte (geçiş yeteneği) olması ve tüm taşıma ve uygulama aşamalarında homojenliğini koruması (ayrışma direnci) da aranmalıdır (Özkul ve diğ., 2006).

Kendiliğinden yerleşen betonlar, yüksek işlenebilirlik özelliklerinin yanı sıra, betonun geçirimsizliği bakımından da oldukça üstün özelliklere sahiptir. Betonun su geçirimsizliği, boşluk miktarı ve yapısı ile doğrudan bağlantılıdır. Dış ortama açık, boşluk oranı yüksek olan betonda suyun, dolayısıyla suda çözülen zararlı kimyasalların beton bünyesine girmesi oldukça kolaylaşır ve betonun dayanıklılığı olumsuz yönde etkilenir (Atahan, 2002). Boşlukların miktarı, çap ve şekilleri betonun su/çimento oranına, hidrasyon derecesine, maksimum agrega boyutuna, çimento cinsine ve inceliğe bağlıdır (D.S.İ, 1993).

Kendiliğinden yerleşen betonun kullanımını arttırmak amacıyla 2005 yılında, Uluslararası Prefabrike Beton Üreticileri Birliği (BIBM), Avrupa Çimento Birliği (CEMBUREU), Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO), Avrupa Beton Katkı Üreticileri Federasyonu (EFCA) ve Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Avrupa Federasyonu (EFNARC) birleşerek ortak bir şartname hazırlamışlardır (EFNARC,2005).

İnşaat imalat sürelerinin kısaltılması için sıklıkla kullanılan betonun biran önce prizini alması ve yeterli dayanıma ulaşması beklenir. Yeterli dayanıma ulaşmak ise çimentonun hidrasyonu ile alakalıdır. Çimentonun hidrasyonu sıcaklıkla doğru orantılıdır. Çimento bazlı malzemelerde, başlangıçta akışkan olan sistemin oluşan hidrasyon reaksiyonları sonucunda katı bir hale gelmesine “priz” adı verilmektedir. Betonda prizi kontrol eden kimyasal katkıları, taze beton karışımında reolojik değişimlere neden olmaktadır. Priz düzenleyici katkıların çimento üzerindeki etkisi, anyon (silika ve aluminat) ve katyonlardan (kalsiyum) oluşan susuz bileşenleri çözmesi olarak açıklanabilmektedir (Subaşı, 2009). Priz hızlandırıcıların görevi çimentodaki anyon ve katyonların çözünmesini artırmak, priz geciktiricilerin görevi

ise anyon ve katyonların çözünmesini engellemektir (Mehta ve Monteiro 1997, Rixom ve Mailvaganam 1999, Paiva vd. 2009).

Priz hızlandırıcı katkı sınıfında yer alan ani priz yapıcı katkılar ile betonda erken yüksek dayanımları sağlayan katkıların yapıları ve çimento üzerindeki etkileri farklıdır. Ani priz yapıcı katkılar daha çok püskürtme betonlarda (shotcrete) kullanılır. Bu tür katkılar, çimentonun C3A grubu ile reaksiyona girerek ani hidrasyon oluşumu sağlar ve katılaşma üzerinde etkili olur. Betonda erken dayanım ve donma-çözünme etkilerine dayanıklılık sağlayan katkılar ise çimentonun C3S grubu ile reaksiyona girerek erken katılaşırlar.

Priz hızlandırıcılardan kalsiyum klorür ( $\text{CaCl}_2$ ) etkin ve ekonomik bir hızlandırıcı olmasına rağmen, betonun içerisine yerleştirilen çelik donatıya verdiği aşındırıcı etkiden ötürü kullanımı kısıtlanmış ve uygulayıcıları klorür içermeyen priz hızlandırıcılara yönlendirmiştir. Sülfatlar, formatlar, nitratlar ve trietanolamin içeren birçok bileşen bu amaç için geliştirilmiştir (Rixom ve Mailvaganam 1986).

Priz hızlandırıcı katkılar, çimento ve su arasındaki reaksiyonu hızlandırarak çimento taneciklerini birbirine bağlayan jel oluşum hızını artırır. Jel oluşumu sırasında, ilk saatlerde yoğun hidrasyon ısısının açığa çıkması nedeni ile soğuk havalarda beton donma etkisinden korunmaktadır. Ayrıca, ilk mekanik dayanımı artırma özellikleri de bulunmaktadır. Ancak betonda işlenebilme kaybına neden olma, nihai dayanımını azaltma, alkali-agrega reaktivitesini artırma ve hidrasyon ısısını yükseltme (sıcak hava dökümlerinde sorun) priz hızlandırıcıların olumsuz özelliklerindendir (Akman, 1987).

Çimento hidrasyonunu hızlandırmak için son yıllarda sentetik C-S-H tohumu gibi nanopartiküllerden de faydalanılmaktadır. Bu yöntemle, normal şartlarda kristal gelişimi için gerekli ama zaman kaybına sebep olan çekirdeklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, çimento hidrasyonunun ölü evresi kısalmaktadır (Alizadeh ve diğ., 2009). Nanopartikül ilavesiyle hidrasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan yöntemde, hidrasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil, aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde, çimento taneleri arasında da oluşmaktadır. Sonrasında çimento hidrasyon ürünleri bu çekirdekler sayesinde kristal büyüme mekanizmasıyla oluşur. Nanopartiküllerin ilavesi sayesinde, hidrasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında da oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha boşluksuz, erken yaşta yüksek

basınç mukavemetine sahip çimento esaslı malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir (Özbora ve diğ., 2013)

Literatür araştırmasında KYB ve YFC hakkında birçok çalışmaya rastlanmıştır. Sentetik C-S-H ise yeni sayılacak bir üründür. Yaptığımız literatür taramasında sentetik C-S-H bileşiklerinin KYB üzerindeki etkilerini araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

## **1.1 Kendiliğinden Yerleşen Beton**

### **1.1.1 Kendiliğinden yerleşen betonun tanımı**

Kendiliğinden Yerleşen Beton, kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmayacak kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür .

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.

### **1.1.2 Kendiliğinden yerleşen betonun tarihçesi**

Betonda kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı ilk olarak Tokyo Üniversitesinde, 1986 yılında Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır.

Kendiliğinden yerleşen beton konusunda ilk makale, 1989 yılında Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı'nda (EASEC) sunulmuştur.

KYB konusunda ilk kitap Okamura tarafından yazılmış olup, 1993 yılında Japonca olarak yayınlanmıştır (Felekoğlu, 2003) .İlk KYB uygulaması 1980'lerin başında İtalya'nın S.Marco Rıhtım inşaatında sualtı temel betonu dökümünde 40.000 m<sup>3</sup> Reoplastik Beton kullanılarak yapılmıştır (Collepari, 2001). 2000 yılı sonunda KYB kullanımı Amerika'da yaygınlaşmaya başlamıştır. Prefabrike beton endüstrisi bu gelişmeye hızla ayak uydurmuş fakat hazır beton endüstrisinde kullanımı kısıtlı kalmıştır (Felekoğlu, 2003).

### **1.1.3 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları ve dezavantajları**

#### **1.1.3.1 Kendiliğinden yerleşen betonun avantajları**

Taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacak, böylece vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybı ortadan kalkacaktır. Vibratör kullanımının çevreye yaydığı gürültü kirliliği (özellikle prefabrike beton sektörü için) önlenecektir (Walraven, 2002).

Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını arttıracaktır (Felekoğlu, 2003).

Efektif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla, prefabrike sektöründe erken kalıp alma için, özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabılır (Corradi vd., 2002).

KYB'nin perdahlanabilirliği geleneksel betona kıyasla daha rahattır. Beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırır.

KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldırabilir.

#### **1.1.3.2 Kendiliğinden yerleşen betonun dezavantajları**

KYB malzeme maliyeti açısından normal betona kıyasla daha pahalıdır. Maliyeti arttırıcı ana etken efektif kimyasal katkıları olup, gelecekte bu katkıların maliyetlerinin düşmesi beklenmektedir.

KYB'nin performansı malzeme tip ve oran değişkenliklerine hassastır (özellikle agrega nemi ve gradasyonu). Klasik betona göre daha sıkı kontrol gerektirir.

Kesinleşmiş dizayn yöntemi ve standart deneylerinin yokluğu kalite kontrol işlerinde genelleme yapılmasını engellemekte ve standartlaştırmada sıkıntılara yol açmaktadır. Geleneksel betona göre yüksek oranda toz malzeme içerdiği için, boyutsal stabilitesi toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar doğurabilir (Felekoğlu, 2003).

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

KYB oldua akışkan kıvamda olduğundan özellikle yüksek perde gibi elemanlarda kullanıldığında hidrostatik basınç etkisi için kalıp extra sağlamlaştırılmalıdır.

#### **1.1.4 Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları**

Günümüzde KYB özel tip betonlar sınıfında sayılabilir. Genellikle büyük boyutlu inşaatlarda, sık donatılı dar kesit özelliklerinin bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, tamir, bakım ve yenileme işlerinde, tünel gibi özel kalıp gerektiren işlerde kullanılan KYB henüz normal beton kadar geniş kullanım alanına sahip değildir. Bunun en önemli nedeni maliyetinin yanı sıra, dizayn ve uygulama alanlarında yeni yöntemler gerektirmesidir. KYB üretiminde yöntem geliştirilmesi çalışmaları çeşitli kuruluşlar tarafından devam ettirilmektedir.

Geleneksel betonun teknik olarak kullanımının mümkün olamayacağı durumlarda KYB kullanımı tercih edilebilir. Örneğın, bakım ve onarım işlerinde betonla doldurulacak bölgeye vibratör girmesi mümkün değilse geleneksel beton kullanılamaz. Böyle bir durumda KYB kullanımı en akılcı çözüm olacaktır (Özkul 2002).

ABD’de KYB’nin kullanımı otoyol köprü inşaatlarında ve oldukça sınırlıdır. Bununla beraber, Amerika prefabrik endüstrisi KYB teknolojisini mimari beton uygulamalarında kullanmaya başlamıştır. KYB, otoyol köprü inşaatlarında daha geniş uygulama için yüksek bir potansiyele sahiptir. 2000 yılında Japonya’da prefabrik elemanlarda ve hazır beton olarak kullanılan KYB miktarı yaklaşık, 400.000 m<sup>3</sup> olmuştur (Okamura ve Ouchi vd, 2003).

Geleneksel beton ile yol üst kaplaması inşaatında yüzeysel vibratörler kullanılmaktadır. Amerika’da özellikle donma-çözölme riski olan bölgelerde, hava sürükleyici katkı kullanılarak hava içeriğı yüksek beton tasarımları hazırlanmaktadır. Fakat vibrasyon işlemi taze betonda hava kabarcığı kaybına yol açabilmektedir. Örneğın, Iowa eyaletinde servis ömründen çok daha önce donma-çözölme hasarına uğrayan yol kaplamaları tespit edilmiştir. Bu kaplamaların taze haldeki hava içerikleri şantiyede ölçüldüğünde yüksek seviyelerde olduğu raporlarda görölmüştür. Fakat yerleştirme sırasında yapılan vibrasyonun beton içindeki hava yapısını özellikle yüzey bölgesinde bozduğu ve taze betonun hava içeriğini azalttığı belirlenmiştir. Bu örnekte de görüldüğü gibi, vibrasyon işleminin yararın yanında zarar da getirdiğı durumlar söz konusudur ( Hughes ve diğ., 2002).

Yol üst yapısında geleneksel beton kullanılması halinde yetersiz veya aşırı sıkıştırma, taşıma sırasında ayrışma, yerleştirme süresi ve dayanım kazanma hızı (trafiğe açılma süresi) gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Felekoğlu, 2003).

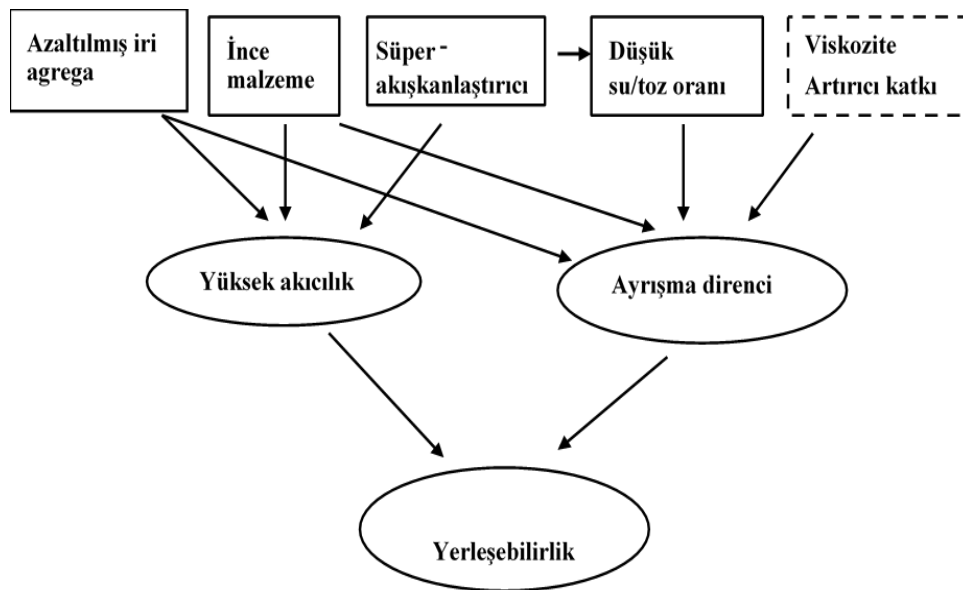
## 1.2 Kendiliğinden Yerleşen Beton Özellikleri

### 1.2.1 Tasarım yöntemleri

KYB'nin akıcı kıvamlı bir beton olmasından dolayı bu tür betonların taze hal ve reolojik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Taze hal özelliklerinde meydana gelebilecek bir olumsuzluk KYB'nin mekanik ve durabilite özelliklerini de olumsuz etkilemektedir (Okamura ve Ozawa,1995). Bu nedenle, KYB'nin kendiliğinden yerleşebilirlik mekanizmasını bilmek iyi bir tasarım yapmak için oldukça önemlidir.

KYB üretiminde, sınırlı iri agrega miktarı ve güçlü bir süperakışkanlaştırıcı yüksek akıcılık özelliğini gerçekleştirirken, azaltılmış (su/ince malzeme) oranı, sınırlı iri agrega miktarı, artırılmış ince malzeme (toz malzeme) ve/veya viskozite artırıcı katkı yüksek ayrışma direncini sağlamaktadır (Şekil 1.1).

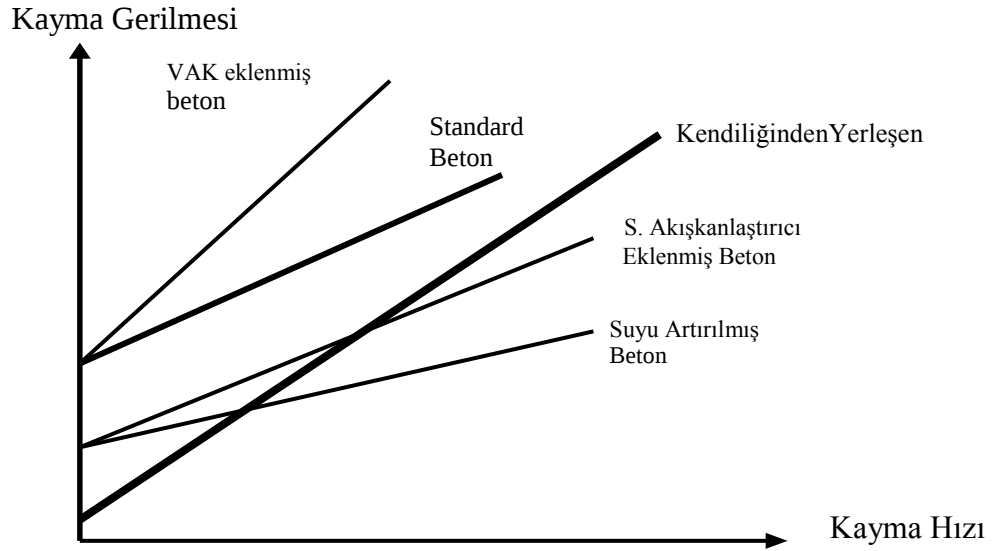
En yaygın kullanılan süperakışkanlaştırıcı polimer karboksilat esaslı olmaktadır, ancak sülfonatmelamin formaldehid ve naftalin formaldehid benzeri polimerler de kullanılmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı dağıtıcı (dispersiyon) etkisini, çimento tanelerini aynı işaretle elektriksel olarak yüklerken aynı zamanda doldurma (sterik) etkisi ile de ince tanelerin birbirlerini itmesine borçludur. (Özkul,2002)



Şekil 1.1: KYB'da bileşenlerin beton özelliklerine etkileri

Geleneksel betonda akışkanlık su ile sağlanmaya çalışıldığında sadece kayma eşiği düşmemekte, aynı zamanda viskozite de azalmaktadır (Şekil 1.2).

Viskozitenin düşmesi ise ayrışmaya yol açmaktadır. Süperakışkanlaştırıcı katkı kullanımı geleneksel betonda viskoziteyi değiştirmeden kayma eşiğini azaltmaktadır. Silis dumanı kayma eşiğini artırırken (viskoziteyi etkilemeden) hava sürüklemeye kayma eşiğini düşürmektedir. Diğer mineral katkıların etkisi ise kayma eşiğini azaltırken viskoziteyi artırıcı ya da azaltıcı yönde olabilmektedir.



**Şekil 1.2:** Beton bileşenlerinin reolojik özelliklere etkisi

KYB'ların tasarımlarında temel olarak 3 yöntem izlenmektedir:

- 1-Artırılmış ince malzeme (toz malzeme) yöntemi
- 2-Viskozite artırıcı katkı kullanımı
- 3-Her iki yaklaşımın karışımı

Birinci yöntemde ayrışma direnci ve yayılma, çimento inceliğinde veya daha ince olan malzeme miktarı artırılarak sağlanmaktadır. Bu malzemelerin bir bölümünü çimentonun kendisi oluşturur; buna ek olarak uçucu kül, öğütülmüş kalker , yüksek fırın cürufu (öğütülmüş), silis dumanı kullanılabilir. Bu yöntem viskoziteyi inert veya puzolanik filler ile artırma ilkesine dayanır. Temel kural olarak toz hacmi, toplam hacmin % 36'sından az olmamalıdır. Çimento hamurunun hacmi, eklenen toz malzemeler ile artırılarak taze betonun stabilitesinin korunması amaçlanmıştır .

İkinci yöntemde ince malzemeyi artırmak yerine viskozite artırıcı katkı (VAK) kullanılmaktadır.

Üçüncü yöntemde ise ince malzeme çok fazla artırılmadan ya da ince malzemeye ek olarak VAK ilave edilmektedir. Viskozite artırıcı katkı bir doğal sakız (gum) olabildiği gibi (welan gum), nişasta eteri esaslı, ve yoğunlaştırılmış silis esaslı da olabilmektedir.

EFNARC'a (2002) göre KYB de tasarım oranlarının ve miktarlarının belirlenmesinde hacimsel oranlar daha önemlidir. EFNARC'ın önerdiği başlıca dizayn esasları ve deney sınır değerleri Çizelge 1.1,1.2 de beirtilmiştir. Deney sonuçlarına göre sınır değerlerin üstündeki ve altındaki durumlarda sorunun tespit edilmesi ve yapılması gerekenler Çizelge 1.3,1.4,1.5 de gösterilmiştir.

**Çizelge 1.1:** EFNARC KYB Tasarım yaklaşımı

| Bileşen            | Tipik kütlece aralık                                                                                                         | Tipik hacimce aralık       |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Toz(0-0.125mm)     | 400-600 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                    | 160-270 lt /m <sup>3</sup> |
| İri agrega(4-16mm) | 750-1000 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                   | 270-360                    |
| Kum(0-4mm)         | Diğer malzeme hacimlerine göre 1 m <sup>3</sup> ü tamamlamalıdır. Toplam agrega ağırlığının % 48 ile %55 arasında olmalıdır. |                            |
| Su                 | 150-210                                                                                                                      |                            |
| Su/toz             |                                                                                                                              | 0,85-1,10                  |
| Hamur hacmi        |                                                                                                                              | 300-380 lt/m <sup>3</sup>  |

**Çizelge 1.2:** EFNARC'a (2002) göre tavsiye edilen KYB deneyleri sınır değerleri

|   | Metot                 | Birim                                   | Minimum Sınır | Maksimum Sınır |
|---|-----------------------|-----------------------------------------|---------------|----------------|
| 1 | Çökme-Yayılma         | mm                                      | 650           | 800            |
| 2 | T50 cm yayılma süresi | s                                       | 2             | 5              |
| 3 | J-halkası             | mm                                      | 0             | 10             |
| 4 | V-hunisi              | s                                       | 6             | 12             |
| 5 | 5 dk. sonra V-hunisi  | s                                       | 0             | + 3            |
| 6 | L-kutusu              | (h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )       | 0.8           | 1.0            |
| 7 | U-kutusu              | (h <sub>2</sub> -h <sub>1</sub> )<br>mm | 0             | 30             |
| 8 | GTM Stabilite deneyi  | %                                       | 0             | 15             |
| 9 | Orimet                | s                                       | 0             | 5              |

**Çizelge 1.3:** Sınır değerin üstündeki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu

| No | Metot               | Birim | Üst Sınır Değer | Çizelge 1.5 ile ilgili satır | Muhtemel Etki                |
|----|---------------------|-------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| 1  | Çökme-Yayılma       | mm    | 800             | b                            | Viskozite çok düşük          |
|    |                     |       |                 | d                            | Ayrışma                      |
| 2  | T50 süresi          | s     | 5               | a                            | Viskozite çok yüksek         |
|    |                     |       |                 | c                            | Eşik kayma değeri çok yüksek |
| 3  | J-halkası           | mm    |                 | b                            | Viskozite çok düşük          |
|    |                     |       |                 | d                            | Ayrışma                      |
| 4  | V-hunisi            | s     | 12              | a                            | Viskozite çok yüksek         |
|    |                     |       |                 | c                            | Eşik kayma değeri çok yüksek |
|    |                     |       |                 | f                            | Bloke olma riski             |
| 5  | 5 dk sonra V-hunisi | s     |                 | d                            | Ayrışma                      |
|    |                     |       |                 | e                            | Hızlı işlenebilirlik kaybı   |
|    |                     |       |                 | f                            | Bloke olma riski             |
| 6  | L-kutusu (h2/h1)    |       | 1               | g                            | Hatalı sonuç                 |

**Çizelge 1.4:** Sınır değerlerin altındaki değerler için sorunun belirlenmesi ve etki takip tablosu.

| No | Metot               | Birim | Alt sınır değer | Çizelge 1.5 ile ilgili satır | Muhtemel Etki                |
|----|---------------------|-------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| 1  | Çökme-Yayılma       | mm    | 650             | a                            | Viskozite çok yüksek         |
|    |                     |       |                 | c                            | Eşik kayma değeri çok yüksek |
| 2  | T50 süresi          | s     | 2               | b                            | Viskozite çok düşük          |
| 3  | J-halkası           | mm    | 10              | a                            | Viskozite çok yüksek         |
|    |                     |       |                 | c                            | Eşik kayma değeri çok yüksek |
|    |                     |       |                 | d                            | Ayrışma                      |
|    |                     |       |                 | f                            | Bloke olma riski             |
| 4  | V-hunisi            | s     | 8               | b                            | Viskozite çok düşük          |
| 5  | 5 dk sonra V-hunisi | s     |                 | g                            | Mantık dışı                  |
| 6  | L-kutusu (h2/h1)    |       | 0.8             | a                            | Viskozite çok yüksek         |
|    |                     |       |                 | c                            | Eşik kayma değeri çok yüksek |

**Çizelge 1.5:**Problemlerin çözümüne yönelik yapılması gerekenler (Felekoğlu,2003)

|    | <b>Tahmini etki</b>                 | <b>Doldurma kapasitesi</b> | <b>Geçiş yeteneği</b> | <b>Ayrışma direnci</b> | <b>dayanım</b> | <b>büzülme</b> | <b>sünme</b> |
|----|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------|----------------|--------------|
| A  | Viskozite çok yüksek                |                            |                       |                        |                |                |              |
| a1 | Karışım suyunu arttır.              | +                          | +                     | -                      | -              | -              | -            |
| a2 | Hamur hacmini arttır.               | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| a3 | Akışkanlaştırıcı dozajını arttır.   | +                          | +                     | -                      | +              | 0              | 0            |
| B  | Viskozite çok düşük                 |                            |                       |                        |                |                |              |
| b1 | Karışım suyunu azalt.               | -                          | -                     | +                      | +              | +              | +            |
| b2 | Hamur hacmini azalt.                | -                          | -                     | -                      | -              | +              | +            |
| b3 | Akışkanlaştırıcı dozajını azalt.    | -                          | -                     | +                      | -              | 0              | 0            |
| b4 | Viskozite arttırıcı katkı kullan    | -                          | -                     | +                      | 0              | 0              | 0            |
| b5 | Kullandığın tozu incelt             | +                          | +                     | +                      | 0              | -              | -            |
| b6 | Daha ince kum kullan                | +                          | +                     | +                      | 0              | -              | 0            |
| C  | Eşik kayma değeri çok yüksek        |                            |                       |                        |                |                |              |
| c1 | Akışkanlaştırıcı dozajını arttır.   | +                          | +                     | -                      | +              | 0              | 0            |
| c2 | Hamur hacmini arttır.               | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| c3 | Harç hacmini arttır.                | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| D  | Ayrışma                             |                            |                       |                        |                |                |              |
| d1 | Hamur hacmini arttır.               | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| d2 | Harç hacmini arttır.                | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| d3 | Karışım suyunu azalt.               | -                          | -                     | +                      | +              | +              | +            |
| d4 | Daha ince toz kullan                | +                          | +                     | +                      | 0              | -              | -            |
| E  | Hızlı işlenebilirlik kaybı          |                            |                       |                        |                |                |              |
| e1 | Hidratasyon hızı yavaş çimento seç. | 0                          | 0                     | -                      | -              | 0              | 0            |
| e2 | Geciktirici katkı kullan.           | 0                          | 0                     | -                      | -              | 0              | 0            |
| e3 | Akışkanlaştırıcıyı değiştir.        | ?                          | ?                     | ?                      | ?              | ?              | ?            |
| e4 | Çimento yerine filler ikame et.     | ?                          | ?                     | ?                      | ?              | ?              | ?            |
| F  | Bloke olma riski                    |                            |                       |                        |                |                |              |
| f1 | Agrega çapını azalt                 | +                          | +                     | +                      | -              | -              | -            |
| f2 | Hamur hacmini arttır.               | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| f3 | Harç hacmini arttır.                | +                          | +                     | +                      | +              | -              | -            |
| G  | Hatalı sonuç                        |                            |                       |                        |                |                |              |
| g1 | Deney şartlarını kontrol et.        | hata                       | hata                  | hata                   | hata           | hata           | hata         |

Tasarımcının, üreteceği KYB'un özelliklerini kullanım yerine göre tanımlaması gerekir. Çizelge1.6 'da değişik kullanım yerleri için KYB'ların özellikleri çökme-yayılma ve V-hunisi değerleri olarak verilmiştir(Özkul,2002).

**Çizelge 1.6:** Değişik uygulamalar için kıvam parametreleri

|                        |           |          |              |                       |
|------------------------|-----------|----------|--------------|-----------------------|
| V-Hunisi<br>Süresi (s) |           |          |              |                       |
| 9-25                   | Eğimli    |          | Yüksek-Narin |                       |
| 5-9                    |           | Perdeler |              |                       |
| 3-5                    | Döşemeler |          |              |                       |
|                        | 5         | 6        | 7            | Kıvam Sınıfı          |
|                        | 470-570   | 540-660  | 630-800      | Çökme-Yayılma<br>(mm) |

### 1.2.2 KYB bileşenleri

KYB'nin bileşenlerinin belirlenmesi, geleneksel betona göre daha fazla deneyim ve bilgi birikimi gerektirmektedir. Çünkü KYB'den sertleşinceye kadar beklenen performans, geleneksel betona göre daha farklıdır

Betondaki her bileşenin kendiliğinden yerleşebilirliğe farklı etkisi vardır. Etki, bileşenin cinsine, teknik özelliklerine, kullanım oranı ve yöntemine bağlıdır. Bu sebeple bileşenlerin seçiminde gerek teknik gerekse ekonomik açıdan doğru seçim yapmanın yolu, malzemeleri iyi tanımaktan geçer.

#### 1.2.2.1 Çimento

Çimento, kil ve kalkerin belirli oranlarda karıştırılıp 1400 °C sıcaklıkta döner fırınlarda pişirilip priz süresini ayarlamak için yaklaşık %3-5 alçıtaşı ilave edilerek öğütülmek suretiyle elde edilir. Su ile karıştırıldığında hem havada ve de suda katılaşan hidrolik ve inorganik bağlayıcıdır. 5 tip çimento vardır.

- Portland çimentosu
- Portland kompoze çimento
- Yüksek fırın cürufu çimento
- Puzolanik çimento
- Kompoze çimento

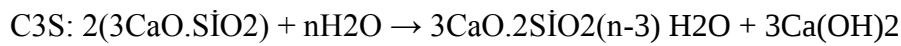
Dayanım sınıfı olarak çimentonun 28 günlük değerleri 32,5;42,5;52,5 olarak üç grupta mekanik özellikleri incelenir. Normal erken dayanıma sahip olanlar N, yüksek erken dayanıma sahip olanlar R harfi ile simgelenir. (EN-197-1,2000)

ASTM 'ye göre çimento tipleri ve anabileşen miktarları çizelge 1.7 'de gösterilmiştir

**Çizelge 1.7:** ASTM 'ye göre çimento tipleri ve anabileşen miktarları

| Tip | Açıklama                    | Trikalsiyum Silikat<br>% C <sub>3</sub> S<br>3CaO.SiO <sub>2</sub> | Dikalsiyum Silikat<br>% C <sub>2</sub> S<br>2CaO.SiO <sub>2</sub> | Trikalsiyum Alüminat<br>% C <sub>3</sub> A<br>3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Tetrakalsiyum Alüminat<br>% C <sub>4</sub> AF<br>4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
|-----|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| I   | Portland çimentosu          | 50-65                                                              | 10-30                                                             | 0-17                                                                              | 6-18                                                                                 |
| II  | Portland Kompoze çimento    | 35-60                                                              | 15-35                                                             | 0-8                                                                               | 6-18                                                                                 |
| III | Yüksek Fırın Cürufu çimento | 45-70                                                              | 10-30                                                             | 0-15                                                                              | 6-18                                                                                 |
| IV  | Puzolanik çimento           | 20-30                                                              | 50-55                                                             | 3-6                                                                               | 8-15                                                                                 |
| V   | Kompoze çimento             | 40-60                                                              | 15-40                                                             | 0-5                                                                               | 10-18                                                                                |

Çimentonun karma oksitlerinin hidratasyonu sonucu C-S-H ve Ca(OH)<sub>2</sub> oluşur, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S



Çimento tipi açısından dayanım ve dayanıklılık kriterleri dikkate alınarak seçim yapılmalıdır .

Özellikle çimentonun C<sub>3</sub>A oranı % 10'un üzerindeyse, kullanılmaması EFNARC Komitesi (2002), tarafından tavsiye edilmektedir.

Çimento miktarı arttıkça plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi artacağından yüksek çimento dozajlarında akışkanlaştırıcı katkı ihtiyacı artar (Roshavelov, 2002).

Kendiliğinden yerleşen betonda çimento dozajının belirlenmesinde temel kriter dayanım sınıfıdır. Puzolanik filler kullanılması halinde, göreceli olarak daha düşük çimento dozajları yeterli olacaktır. Dayanım ve dayanıklılık açısından çimento dozajının 350 - 450 kg/m<sup>3</sup> arasında seçilmesi tavsiye edilmektedir. 500 kg/m<sup>3</sup>'ün üstünde kullanımı rötreyi arttıracığından tavsiye edilmez. 350 kg/m<sup>3</sup>'ün altında

kullanımı ise, ilave fillerle veya viskozite arttırıcı kimyasal katkılarla birlikte kullanılması halinde uygundur. Eğer viskozite ayarlayıcı kimyasal katkı kullanılmıyorsa, kendiliğinden yerleşen betonda toplam toz madde miktarı hiçbir zaman  $500 \text{ kg/m}^3$ 'ün altına inmemelidir. Çimento dozajının bu miktarın altında olması durumunda, ilave toz katkıları kullanılabilir (EFNARC, 2002)

#### **1.2.2.2 Agregası**

Agregası mineralojik köken açısından normal betonda kullanılabilecek özellikte olmalıdır. Kıırma kireçtaşı iri agregası olarak kullanılabilir. Doğal kum, kıırma kuma göre işlenebilirlik açısından avantajlıdır. Aynı şekilde iri agregası olarak dere çakılı kullanılması iç sürtünmeyi azalttığı için akışkanlığı artırır (EFNARC ,2002).

Agregası açısından taze betonun kendiliğinden yerleşebilirliğini etkileyen en önemli parametre iri agregası/kum oranıdır. İçsel sürtünme katsayısını azaltmak için bu oran mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır (Sarı ve diğ., 1999).

Geleneksel betona göre daha çok kum ve daha az iri agregası kullanımı donatılar arasında geçiş yeteneğini de artırır (Su ve diğ., 2001).

Basınç dayanımına bakıldığında belli bir orandan sonra düşüş görülmektedir. Fang ve arkadaşları, kum oranının toplam hacmin % 45 - 48'i arasında tutulması halinde kendiliğinden yerleşebilirliğin en yüksek dayanımda sağlanacağını savunmaktadır ( Fang ve diğ. , 1999).

Genel olarak kübik veya küre şekilli agregalar tercih edilmelidir. Uzun silindir ve yassı disk şekilli taneler KYB'nin işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkileyeceğinden bunların miktarının sınırlandırılmasında yarar vardır (Khurana ve Topçu, 2002).

Sarı vd. (1999)'ne göre kendiliğinden yerleşen betonda en büyük agregası çapı 5 - 20 mm arasında değişir ama V-henisinde bloke olma tehlikesini engellemek için 15 mm seçilmesi en uygundur. Tüm karışımındaki iri agregası oranının % 29'un üzerine çıkması halinde, iç sürtünme açısında artış meydana gelmektedir. Bu artış plastik viskozitenin yükselmesine sebep olmaktadır (Fugiwara ve Nagataki 1999). Felekoğlu, (2003) yaptığı çalışmalarda, kum/iri agregası oranı için en uygun değeri 1.53 olarak tespit etmiştir. Bu değerin altındaki oranlarda taze betonun bloke olma riski artmakta, üstündeki oranlarda ise viskozite aşırı artmaktadır.

Su/Toz oranı 0.35 ve en büyük agrega çapı 20 mm olan, kendiliğinden yerleşen beton tasarımı için iri agreganın toplam agrega hacmine oranının 0.52 olması halinde, en düşük hamur hacmi kullanılarak kendiliğinden yerleşebilirliğin sağlanmaktadır (Bui ve Montgomery 1999).

### 1.2.2.3 İnce (toz) madde

Toz maddeler, parçacık boyutu 125 mikronun altında her türlü inorganik madde olarak tanımlanabilir.

Toz maddeler KYB’de viskozite arttırmak amacıyla kullanılırlar. Parçacık boyutunun küçülmesi parçacıklar arası etkileşimin artmasına sebep olur ve bu etkileşim viskoziteyi artırır (Sari ve diğ., 1999).

Viskozite arttırmak için kullanılabilecek toz maddeler, uçucu kül, silis dumanı, doğal ve yapay cüruflar, kuvarz kumu tozu, kireçtaşı tozu ve cam tozudur (Persson ,2001).

Yapılan araştırmalarda % 10’u 0.2 mm’den geçip 0.1 mm üzerinde kalan tozlar KYB için olumsuz performans göstermiştir (Khurana ve Topçu, 2000). Toz malzeme oranının 400 ila 650 kg/m<sup>3</sup> arasında olması tavsiye edilmektedir. Bu miktar kum ve agrega tanecikleri arasındaki boşlukların doldurması için ve daha iyi sıkışma sağlanması için önerilmektedir (Sari ve diğ. 1999).

KYB tasarımında ince öğütülmüş (Blaine değeri > 2500 cm<sup>2</sup>/g) kireçtaşı tozu, granit, kuvarz kumu kullanılabilir. Taş tozunun beton karışımında homojen dağılması sağlanmazsa, dayanım ve dayanıklılık açısından olumsuz etkiler yaratabilir.

Taş tozu ile üretilen KYB, diğer puzolanik maddelerin kullanıldığı KYB’lere kıyasla, kür işlemine daha az hassastır. Taş tozunun pürüzlü mikro yüzeyi nedeniyle, yüksek oranda karışım suyu absorbe etmesi ve erken dayanımı hızlandırıcı etkisi sebepleriyle küre hassasiyetinin azaldığı kabul edilebilir (Ho ve diğ., 2002). Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanılan kum içinde 0.125 mm elekten geçen toz malzeme oranının yüksek olması halinde bu miktar, inert fillere dahil edilmelidir. Böylece hesaplamalar daha hassas yapılabilir (EFNARC, 2002).

Uçucu kül, taş tozuna kıyasla düşük eşik kayma gerilmesi değeriyle daha yüksek viskozite elde edilmesini sağlar (Yahia ve diğ., 1999).

Yüksek Fırın Curufunun KYB üzerine sağladığı olumlu katkılar şöyle sıralanabilir:

- Hidratasyon ürünlerini artırır ve betonun porozitesini azaltır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece betonun dış etkilere karşı dayanıklılığı artar (Jianxiong ve diğ.,1999).
- Hidratasyon hızını ve ısını düşürür. Sıcaklık yükselmesinden doğan su kaybını ve çatlakları azaltır. Fakat priz alma süresini geciktirmesi erken dayanımı olumsuz etkiler (Bouzoubaa ve Lachemi, 2001) .
- Normal betona kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli çimento miktarını azaltarak ekonomik fayda sağlar. Aynı zamanda atık bir ürün değerlendirildiği için ilave ekonomik ve çevresel yararları hesaba katılmalıdır.

Toz tipi seçilirken fiziksel, kimyasal özellikler ve mekanik performansın yanında maliyet unsuru da göz önünde bulundurulmalıdır.

### **Uçucu Kül**

Uçucu küller (UK) ya da pulverize yakıt külleri, özellikle termik santrallerde pulverize kömür ile işleyen fırınlarının toz tutma ünitelerinden atmosfere salınması elektrofiltrelerle engellenen atıklardır.

Kömür % 80'inin 75 µm elekten geçecek incelikte öğütülmekte ve havayla birlikte, buhar üretici kazanları ısıtmak amacıyla, yakıt olarak püskürtülmektedir. Pulverize kömürün yanmasıyla büyük bir miktarı ince olan, bir miktarı da nispeten biraz daha iri boyutlara sahip olan küller, yakıt gazlarıyla beraber “uçarak” bacadan dışarı çıkmak üzere hareket etmektedirler. Nispeten ağır olan kül tanecikleri taban külü olarak ocağın tabanına düşmektedirler. Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık % 75-80'i gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince küllerdir. Bu küllere “uçucu kül” denilmektedir. Ağırlığının yaklaşık %5'i (hacminin %20'si) içi boş (nitrojen veya karbon dioksitle dolu) parçacıklardan oluşmaktadır. Uçucu kül tanecikleri küresel ve boyutları 1-150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Genellikle 2.1-2.7 (ortalama 2,4) g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir( Gündeşli ,2008).

UK'ler, kimyasal kompozisyonlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılmaktadır (Aruntaş,2006).Uçucu küllerin ekonomik olarak değerlendirilmesi, kullanılabilir miktarda, gerekli nakliye miktarına ve istenilen tasarıma bağlıdır. Uçucu kül hidratasyon ısını düşürür ve tanelerin küreselliği sayesinde taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Uçucu külün kimyasal bileşimi, tane boyut dağılımı, inceliği, puzolanik aktivitesi ve betonun

kürkoşulları, uçucu küllü betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir. ASTM-C 618'e göre uçucu kül, iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Tokyay, 1993).

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 reaktif kireç( $\text{CaO}$ ) 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'dan fazla olduğu için bu küller yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılırlar. C sınıfı uçucu küller, puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptirler (Gündeşli, 2008).

F tipi uçucu kül genellikle %10 dan daha az  $\text{CaO}$  içerir. Buna karşın C tipi uçucu kül, %15 ten %35'e kadar  $\text{CaO}$  içerir. Diğer yandan F tipi uçucu kül antrasit ve bitümlü kömürün yanmasından üretilir, bu da düşük kireçli uçucu kül olarak sınıflandırılır. C tipi uçucu kül ise diğer linyit ve bitümlü olmayan kömürün yanmasından elde edilir. Yüksek kalsiyum içeriğine bağlı olarak C tipi uçucu küller puzolanik özelliklerinin yanında bağlayıcı özelliğe de sahiptir. Betonda uçucu kül kullanımının erken yaşlarda yavaş dayanım kazanmasına yol açtığı iyi bilinmektedir. Beton teknolojisindeki son gelişmelerden, kalsiyum içeriği ve tane boyut dağılımının dayanım kazanma hızını belirleyen en önemli parametreler olduğu anlaşılmaktadır.

Ancak, bunlardan sadece 1 tanesinden (Çatalağzı Termik Santrali'den) F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir (Şengül ve diğ., 2007).

Bir başka çalışmada; portland kompoze çimentosu(PKÇ) kullanılan beton karışımlarına çimento ağırlığınca %5, %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül ikame edilerek üretilen 5 farklı beton karışımlarının sodyum sülfat don dayanımı araştırılmıştır. PKÇ'lu betonlarda donma-çözülme dayanımının uçucu kül ikame miktarına bağlı olarak önemli düzeyde değiştiği, uçucu kül ikame miktarı arttıkça bununla ters orantılı olarak donma-çözülme dayanımının azaldığı, %30 uçucu kül ikameli betonların %24 ile en düşük donma-çözülme dayanımına sahip olduğu, %30 oranında uçucu kül ikamesi ile donma-çözülme dayanımının %84 gibi büyük bir oranda azaldığı belirtilmiştir. İçerisine %5'e kadar uçucu kül ikame edilerek

hazırlanan betonların donma-çözülme etkisine maruz kalan açık saha betonlarının, beton yollar gibi uygulamalarda kullanılmasının uygun olduğu ancak daha fazla uçucu kül ikame edilen betonların kullanımının uygun olmadığı açıklanmıştır (Subaşı,2009).

### **Silis dumanı**

Silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında elektrik arkfırınlarında 2000°C’de yan ürün olarak elde edilen mikrosilika, silis dumanı veya silicafume olarak adlandırılır. İnceliği çimentonun 20-25 katı daha fazla olan bu malzemede %90-95 oranında aktif SiO<sub>2</sub> bulunmaktadır ( Yeğınobalı, 2002).

Ülkemizde, ferroalaşımlar sektöründe, ferrosilisyum, düşük ve yüksek karbonlu ferrokrom ile silikoferrokrom üretimi yapılmaktadır. Ülkemizde, Etibank Elektrometalurji Sanayi Tesislerinde 5.000 ton/yıl kapasiteli 6 MVA tarafo gücünde, % 75 ferrosilisyum üreten bir adet ark-direnç fırını mevcuttur

Betonda kullanımı özellikle Kuzey Amerika ve İskandinav ülkelerinde oldukça yaygın olan silis dumanı, mukavemet artışı yanı sıra, geçirgenliği 10 misli azaltarak korozyon, karbonatlaşma ve alkali-sülfat reaksiyonu, gibi beton açısından tehlikeli olan bir çok kimyasal ve biyolojik etkilere karşı dayanımı artırmaktadır (Özturan, 1993).

Ayrıca, çimentonun %10-15’i oranında yer değiştirilerek kullanılması durumunda işlenebilirlik, donma-çözülme dayanımı ve aşınma dayanımında da artışlar meydana geldiği yapılan çalışmalar ile tespit edilmiştir (Yıldız ve diğ.,2006).

Genellikle çimentonun %5-10 arasında SD ile yer değiştirilerek kullanılmasının betonun çeliğin korozyonuna karşı yeterli düzeyde direnç göstermesine katkı sağlamaktadır ( Sancak ve Şimşek, 2008).

Doğal hafif agregalardan pomza ile yapılan taşıyıcı betonda da çimento ile yer değiştirilerek %5-10 oranında kullanılan SD’nın benzer etkiyi yaptığı belirtilmiştir (Türkmen ve diğ.,2003).

Ayrıca yapılan bir araştırmada silis dumanının %10-30 arasında kullanılmasıyla, ASR etkisinin önemli derecede azaldığı rapor edilmiştir(Uygunoğlu,2009).

### **Atık mermer tozları (AMT)**

Mermer fabrikalarından üretim atığı olarak çıkan toz atıklar genellikle değerlendirilememekte, üstelik çevre kirliliği açısından da sorunlar yaratmaktadır.

Mermer toz atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların çevre kirletici özelliğini de önemli ölçüde azaltacaktır. Konuyla ilgili olarak yapılmış olan bir çalışmada, mermer fabrikalarında işlenen mermerlerin ortalama % 30'unun üretim atığı olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Ülkemizde yılda yaklaşık olarak 2 200 000 ton mermer blok işlendiği düşünülürse, 660 000 ton mermer tozunun değerlendirilmeden atıldığı söylenebilir. Böyle bir potansiyeli sanayide değerlendirmek ulusal ekonomiye önemli kazanımlar sağlayacaktır.

Literatür bilgilerinde ve dünyadaki bazı uygulamalarda gerek mermer tozlarının gerekse mermer toz atıklarının seramik, çimento, boya, cam, yapı malzemesi gibi birçok sektörde değerlendirilme çalışmaları mevcuttur. (Terzi, 2000) tarafından yapılan araştırmada özellikle mermer tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde, taşıma ve kurutma maliyetlerinin taş tozu filler maliyetini geçmediği kesimlerde, asfalt betonu karışımlarda taş tozu yerine mermer tozunun filler malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bir araştırmada mermer atıklarının (havuz çökeltisi) beton karışımı içerisinde ince malzeme olarak kullanılması durumunda beton basınç dayanımına etkisi irdelenmiştir.

Üretilen beton karışımlarında ince malzeme olarak kumun yanında hacim olarak % 0, % 10, % 15 ve % 20 oranlarında mermer tozu katılmıştır. Maksimum agrega tane çapı 16 mm. ve su/çimento oranı 0.65 iken, karışımlarda çimento dozajı 300 ve 350 kg olmak üzere toplam 8 seri beton üretmişlerdir. Elde edilen mermer tozunun maksimum tane boyutu 2mm. Olarak kullanılmış, yoğunluğu 2.5 olduğu belirtilmiş ve kum ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Silindir numunelerin basınç dayanımları 300 dozlu %10 ve %15 mermer tozu ilaveli karışımlarda %35 civarında bir artış olmasına rağmen %20 mermer tozu karışımlarda artışın azalmakta olduğu belirtilmiştir.

Sonuç olarak; mermer tozunun belirli oranlarda karışıma katılmasının beton özelliklerine olumlu bir etki yapabileceği açıklanmıştır ( Ünal ve Kibici, 2001).

### **Yüksek fırın cürufu**

Mineral katkı maddeleri içerisinde sıklıkla kullanılan, dayanım ve dayanıklılığa etkisi bilinen bir diğer katkı ise yüksek fırın cürufudur. Bu madde esas itibariyle

demir cevherinden elde edilir. Demir cevheri, esas olarak demir oksit bileşenlerinden oluşmaktadır. Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), limonit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) ve siderit ( $\text{FeCO}_3$ ), doğada en yaygın olarak yer alan cevherlerdir. Demir cevherlerinde, demir oksitin yanısıra, küçük miktarlarda silika ve kil gibi yabancı maddeler de bulunmaktadır. Demir elde etme işlemi, “yüksek fırın” denilen fırınlarda gerçekleştirilmektedir. Cevherdeki demir oksit, demir durumuna dönüşmektedir.

Eriyik durumdaki demir, fırının en alt bölümünde toplanmaktadır. Yine sıcaklığın etkisiyle, kalkerdeki kalsiyum oksit ve demir cevherindeki silika ve alumina gibi yabancı maddeler, eriyik durumda bir topluluk oluşturarak fırının alt bölümünde (eriyik demirin hemen üstünde) yer almaktadır. Yüksek fırından çıkartıldığı zaman yaklaşık  $1500 - 1600\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta ve eriyik durumda olan curuf, su içerisine dökülerek veya bir başka yöntemle çok çabuk soğutulduğu takdirde, iri kum taneleri gibi granüle duruma gelmektedir. Çok çabuk soğutulma işlemi nedeniyle, curufun yapısı amorf durum kazanmaktadır. Curufun bu haline “granüle yüksek fırın curufu” denilmektedir. Puzolanik özellik göstermektedir. Granule yüksek fırın cürufu, demir cevheri fırınında eritilip arıtılırken elde edilen uygun bileşimdeki ergimiş cürufun hızla soğutulması ile elde edilir, kütlece en az  $2/3$  oranında camsı cüruf ihtiva eder ve uygun bir şekilde aktifleştirildiğinde hidrolik özellikler gösterir. Granüle yüksek cürufun kütlece en az %66’sı kalsiyum oksit, magnezyum oksit, ve silisyum dioksit toplamında meydana gelmelidir. Geri kalan kısmı bir miktar alüminyum oksit ihtiva eder. Kütlece (magnezyum oksit + kalsiyum oksit)/silisyum dioksit) miktarı 1.0’dan fazla olmalıdır. TS EN 197’de S harfi ile kısaltılmıştır.

Endüstriyel bir atık olarak oluşan yüksek fırın cürufu depolanmasının zor olması nedeni ile beton sektöründe kullanılması ekonomik sürdürülebilirlik ve çevrenin korunması bakımından önem taşır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu betonda kullanıldığında, çimento hamurunda daha ince ve süresiz boşluk oluştuğu, agrega çimento ara yüzündeki boşlukların azaldığı, betonun kalıcılığının yani dürabilitesinin arttığı gözlenmiştir (Okyay ve Akkaya, 2011).

Yüksek fırın cürufları havada yavaş soğutulduklarında kristal yapıya sahip olurlar. Eğer hızlı bir soğutma işlemine tabi tutulurlarsa irili ufaklı tanelerden oluşan, camsı bir yapıya sahip olurlar. Bu oluşan yapının camsı olmasının temel nedeni hızlı şekilde soğutulan cürufun akışkanlığındaki ani azalmadan dolayı kristal yapının oluşumunun engellenmesidir. Bu tür cüruflara granüle yüksek fırın cürufları denilir. Bu hızlı soğutma işlemleri sırasında esas olarak su kullanılmaktadır. Ayrıca

yapılarında CaO bulundurmalarından dolayı bir miktar bağlayıcı özelliğe de sahiptirler. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufları beton içinde mineral katkı maddesi olarak kullanıldıklarında, bağlayıcı özelliğe sahip olduklarından su ile reaksiyona girerler. Fakat bu reaksiyon sonucunda güçlü bir bağ elde edilemez. Portland çimentosu ile su arasındaki reaksiyonlar sonucunda kalsiyum-silikat-hidrat (C-S-H) jelleri ve kalsiyum hidroksit oluşmaktadır. Cürufun asıl güçlü reaksiyonları alkali ortamda bu CH ile olur. Cüruf ve kalsiyum hidroksitin reaksiyonu sonucunda CSH jelleri gibi çok kuvvetli hidrolik bağlayıcı özellikteki ürünler ortaya çıkmaktadır.

Ortam sıcaklığı arttıkça bu reaksiyonlar daha erken olabilir. Sıcaklığın dışında öğütülmüş yüksek fırın cürufunun aktivitesini ve bağlayıcılığını, cürufun kimyasal kompozisyonu, cürufun yapısının ne kadar amorf olduğu ve cürufun inceliği etkiler (Erdogan, 2003).

Havada yavaş soğutulmuş olan kristal yapılı cüruf puzolanik özellik göstermemektedir. Ancak amorf yapıya sahip olan ve büyük oranda SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren GFYC, öğütülerek çok ince taneli duruma getirildiği takdirde, doğal puzolanların ve uçucu küllerin puzolanik özelliklerine benzer davranış sergilemektedirler (Erdoğan, 1995).

Granüle yüksek fırın cürufunun öğütülmesinde dikkat edilmesi gereken husus, klinkerden ayrı öğütmeye tabi tutulmasıdır. Bunun nedeni; bu malzeme klinkerden daha sert bir malzeme olduğundan, klinkerle birlikte öğütülmesi durumunda klinker; daha ince taneli, cüruf ise daha iri taneli olarak elde edilmektedir

Son 15-20 yıldan bu yana, Güney Afrika'da, Kanada'da, ABD'de, İngiltere'de ve Japonya'da üretilen granüle yüksek fırın cüruflarının hemen hemen tümü beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de cürufun beton katkı malzemesi olarak kullanılması son 10 yıldan bu yana uygulanmaktadır. Sadece Doğu Akdeniz Bölgesinde her yıl oluşan cüruf miktarı 850 bin tondur (<http://www.alomaliye.com/goster.php?id=20400>)

#### **1.2.2.4 Akışkanlaştırıcı katkı**

KYB üretiminde yüksek deformasyon yeteneği ve ayrışmaya karşı yüksek direnç sağlamak gibi birbirinin tersi iki koşul bir arada sağlanmalıdır. Bu da ancak etkili bir akışkanlaştırıcı kimyasal kullanımıyla mümkün olabilir (Hollingsworth, 2002).

Akışkanlaştırıcı katkılar eşik kayma gerilmesini ve plastik viskoziteyi azaltırlar. Akışkanlaştırıcılar düşük S/Ç oranlarında viskoziteyi çok azaltmadan eşik kayma gerilmesini azaltmakta etkilidir (Yamada ve diğ., 2000).

Son 30 yılda akışkanlık sağlama ve su kesme amaçlı en yaygın kullanılan kimyasal katkılar; melamin, naftalin formaldehit kondensatları, modifiye lignosulfonatlar ve suda çözülebilen sentetik polimerlerdir.

Polikarboksilat bazlı katkıların, modifiye lignosulfonatlar, melamin ve naftalin formaldehit kondensatlarına göre akışkanlığı arttırma açısından da önemli üstünlükleri vardır. Akışkanlaştırıcı katkı tipinin değişimi taze betonda işlenebilirlik kaybı mekanizmasını değiştirebilmektedir (Felekoğlu,2003).

(Gürol,1999), polikarboksilat bazlı katkıların çimentoya etkisini şöyle açıklamaktadır. Katkı, dispersiyon etkisi ile topaklaşmayı önler, hidrasyona giren çimento miktarı artar, topaklar arasına hapsolme potansiyeli olan su molekülleri serbest kalarak işlenebilirliği arttırır ve hidrasyona katılır.

### **1.2.3 Taze hal özellikleri**

KYB'nin performansı ile taze beton özellikleri arasında önemli bir ilişki vardır. KYB'nin doldurma yeteneği, ayrışma direnci ve geçiş yeteneği (donatılar arasında) taze beton özelliklerini taşıması gerekir.(Skarendahl ve Petersson,2000)

#### **1.2.3.1 Doldurma yeteneği**

KYB kendi ağırlığı ile şeklini değiştirme ve şekil değiştirme özeliğine sahip olmalıdır. Doldurma yeteneği, betonun boşaltma noktasından ne kadar uzaklığa akabildiği ve bu akışın hızı (şekil değiştirme hızı) kavramlarını içermektedir.

Đyi bir doldurma yeteneği için, şekil değiştirme kapasitesi ile şekil değiştirme hızı arasında bir denge olmalıdır. Betonun iyi deforme olabilmesi için, iri agreg, ince agreg ve her türlü bağlayıcıyı da içeren katı tanecikler arasındaki sürtünmenin azaltılması yararlıdır ancak yeterli değildir. Çimento hamuru fazı da iyi deforme olabilmelidir. Yüksek akışkanlıkla birlikte ayrışmaya karşı yüksek direncin sağlanması, KYB'nin engellerin arasından geçerek doldurma kapasitesinin arttırılması açısından önemlidir. Uygun doldurma yeteneği için çimento hamuru fazının şekil değiştirme yeteneğinin arttırılması ve tanecikler arası sürtünmenin azaltılması gerekmektedir (Bui ve diğ.,2002). Bunun için, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı, dengelenmiş su/bağlayıcı oranı, düşük kaba agreg hacmi (yüksek

çimento hamuru fazı içeriği), kullanılan agrega ve çimentoya göre uygun granülometrisi dikkate alınmalıdır.

### **1.2.3.2 Ayırmaya karşı direnç**

Taze betonda ayırma (segregasyon), bileşen malzemelerin, homojen olmaksızın dağılarak, yapıdaki özellikleri de dağılıma uğratması olayıdır. Normal akışta ayırma göstermeyen taze beton, örneğin sık donatıların bulunması durumunda ayırmaya uğrayabilir. KYB gerek durağan, gerekse akış halinde terleme, çimento hamuru fazı ve agrega ayrışması, kilitlenmeye neden olan kaba agrega ayrışması ve hava boşluğu dağılımında düzensizlik tipi ayırmaları göstermemelidir (Okamura ve Ouchi, 2003). Katkı maddelerinin ayrılmasını azaltmak için, sınırlı agrega içeriği, azaltılmış en büyük agrega tane çapı, düşük su/bağlayıcı oranı veya viskozite arttırıcı bir çözüm olarak seçilebilir. Serbest terlemenin en düşük hale getirilmesi için ise düşük su içeriği, düşük su/bağlayıcı oranı, viskozite arttırıcı veya yüksek yüzey alana sahip bağlayıcılara gereksinim vardır.

### **1.2.3.3 Geçiş yeteneği**

KYB yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayırmaya karşı dirence sahip olduğunda etkili bir işlev görür. Ancak dar geçişler ve çok sık donatı söz konusu olduğunda, ayrıca bir gereksinim daha doğmaktadır ki, bu da kaba agregaların kilitlenmesidir. En iyi doldurma yeteneğine ve ayırma direncine sahip olan bir KYB’de, agrega tane çapı çok büyükse ve iri agregaların içeriği çok yüksekse kilitlenme riski vardır (Gürdal ve Yüceer, 2004). Uygun geçiş yeteneği için, agrega ayrışması azaltılmalı ve uygun iri agrega kullanılmalıdır.

### **1.2.4 Sertleşmiş hal özellikleri**

KYB’nin beklenen mekanik performansı vermesi aşağıdaki kriterlere bağlıdır:

- Talep edilen performansa uygun malzeme tip ve oranlarının seçimi (karışım optimizasyonu),
- Üretim safhasında malzeme tip ve oranlarındaki değişiminin minimizasyonu (homojen malzeme kullanımı, hammadde değişkenliğinden kaynaklanacak problemlerin azaltılması),

- Ortam koşullarının KYB'ye etkisinin göz önüne alınması, bu koşullara uygun önlemlerin hem karışım dizaynında hem de üretim safhasında dikkate alınması,
- Üretim safhasında taze beton kalitesinin seçilen deneylerle sürekli kontrolü, istenen özelliği sağlamayan karışıma anında müdahale yapılması (Felekoğlu, 2003).

#### **1.2.4.1 Basınç dayanımı**

KYB'de de basınç dayanımı talep edilen sınıfı sağlama açısından önemli bir parametredir. KYB'de ilk yaklaşım olarak alınan su/çimento oranı genellikle istenen dayanımın üzerinde bir beton üretilmesine sebep olmaktadır.

KYB'de kullanılan toz madde tipi de dayanım sınıfının değişmesine sebep olmaktadır. Toz tipi metoduyla üretilmiş KYB için geleneksel beton gibi dayanım sınıfı su/çimento ilişkisi kurulması ancak sabit bir toz malzeme kullanılması halinde mümkündür. KYB üretiminde kullanılan toz tip ve miktarları çok değişken olduğundan (taş tozu, uçucu kül, doğal ve yapay cüruflar, silis dumanı vb.) dayanım sınıfı - su/çimento ilişkisinin genellenmesi pratik değildir (Felekoğlu, 2003).

#### **1.2.4.2 Erken dayanım kazanma hızı**

Hiperakışkanlaştırıcılar, kendiliğinden yerleşebilirliği sağlamanın yanı sıra, su kesme işlevi de gördükleri için, ortamdaki su miktarını azaltarak erken dayanımı arttırmırlar .

Toz tipi metodu ile üretilen KYB'lerde taş tozu kullanılması halinde, erken dayanım bir miktar yükselmektedir.

Silis dumanı ve polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı katkıların birlikte kullanımı erken dayanımı arttırmaktadır (Sarp vd., 2002).

Viskozite arttırıcı kimyasal katkıların (VAK) kullanılması halinde, KYB'nin dayanım kazanma hızı yavaşlar (Petersson, 1999).

Mineral katkı olarak YFC kullanımı halinde dayanım kazanma hızı yavaşlar. Sentetik C-S-H kullanılması erken dayanım hızını oldukça artırır (Alizadeh ve diğ., 2009).

#### **Priz hızlandırıcı katkıları**

Priz hızlandırıcı katkıları, priz sürelerini kısaltmak, erken basınç ve çekme mukavemetlerini arttırmak için kullanılır. Priz hızlandırıcı katkıları, çimento ve su arasındaki reaksiyonu hızlandırarak agregayı birbirine bağlayan jel oluşum hızını

arttırır. Jel oluşumu sırasında hidratasyon ısının açığa çıkması nedeni ile soğuk havalarda beton don etkisinden korunmuş olur.

Priz hızlandırıcı katkı sınıfında yer alan ani priz yapıcı katkılar ile betonda erken yüksek mukavemetlere etkili olan katkıların yapıların ve çimento üzerindeki etkileri farklıdır. Ani priz yapıcı katkılar daha çok şatkrit (püskürtme) betonlarda kullanılır. Bu tür katkılar, çimentonun  $C_3A$  grubu ile reaksiyona girerek ani hidratasyon oluşumu sağlar ve sertleşme üzerinde etkili olur. Betonda erken mukavemetlere ve don etkilerine dayanım sağlayan katkılar ise çimentonun  $C_3S$  grubu ile reaksiyona girerek erken sertleşme ve dayanım artışına etkili olurlar. Prizi hızlandıran belli başlı maddeler şunlardır:

- Bütün klorürler, özellikle  $CaCl_2$ ,  $NaCl$ ,  $NH_4Cl$
- Alkali bazlar,  $NaOH$ ,  $KOH$ ,  $NH_3$
- Alkali tuzlar,  $Na_2CO_3$  gibi
- Sodyum fluosilikat  $Na_2SiF_6$
- Kalsiyum nitrat  $CaNO_3$  ve kalsiyum nitrit.

Prizi hızlandıran maddeler arasında en çok kullanılanı kalsiyum klorürdür. Bu maddenin genellikle çimento ağırlığının en fazla %2'si oranında karma suyuna katılarak kullanılması önerilir. Kalsiyum klorür, prizi hızlandırmakla veya başka bir deyimle priz süresini kısaltmakla beraber betonların başlangıçtaki mukavemetlerini artırır. Mukavemetteki artış ilk günlerde büyük iken zaman ilerledikçe azalır. En sonda katkılı ve katkısız betonların mukavemetinde bir fark kalmaz.  $CaCl_2$ 'ün kullanılması halinde, hidratasyon olayı hızlandığından, hidratasyon ısı belirgin bir artış gösterir. Bu özellikten dolayı soğuk havalarda beton dökümü bir miktar  $CaCl_2$  kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu maddenin % 2 oranından daha fazla kullanmasının şu sakıncaları vardır:

- Betonun rötresini artırır.
- Betonun içinde bulunan donatıların korozyonuna neden olur. Bu zararlı etkisinden dolayı betonarme yapılarda  $CaCl_2$  % 1 oranından daha fazla kullanılmamalıdır. Aynı nedenden bu katkı maddesinin ön gerilmeli beton yapılarda kullanılması yasaklanmıştır.

- $\text{CaCl}_2$  rutubet çekici bir maddedir. Bu bakımdan yapıların rutubetli olmasına neden olur.

Kalsiyum klorür, betonun sülfatlı suların etkisi altında bulunması ve bir alkali-agrega reaksiyonunun meydana gelmesi olasılığının varolması hallerinde kullanılmamalıdır (Paillere,2005).

Kalsiyum klorürler için belirttiğimiz yukarıdaki hususlar daha az ölçüde olmak üzere diğer klorürler ve prizi hızlandıran diğer maddeler için geçerlidir (Postacıoğlu, 1986)

Priz hızlandırıcı katkıları, genellikle; erken ve yüksek mukavemet istenen yapı betonları, prefabrik beton üretiminde, soğuk havalarda betonu don etkisinden korumak için, tünellerin şatkrit (püskürtme) ve gunit kaplamalarında, boşluklar, şevler, yüzme havuzları, beton tamirleri, dolgu ve kazılarda, galeriler ve benzeri yerlerde ani destekleme yapar. Islak ve nemli yüzeylere kaplama yapımında, su geçirmezlik istenen yerlerde ve başüstü çalışmalarında kullanılır.

Priz hızlandırıcı katkıları istenen etki, ortam şartları ve çimento tipine bağlı olarak 100 kg çimento için; 500-3000gr katkı maddesi kullanılır. Rengi genellikle beyazdır. Yoğunluğu  $20^\circ\text{C}$ ' de yaklaşık 0.8 kg/lt'dir.

- **Taze Betona Etkisi:** Priz hızlandırıcı katkıları, çimentonun C3S grubu üzerinde etkili olarak hidrasyon sırasında reaksiyon hızını artırır. Bu şekilde betonun sertleşme süresini kısaltır. Kullanılan priz hızlandırıcının kimyasal bileşimine bağlı olarak % 5- %7 su kesme özeliği de vardır.

- **Sertleşmiş Betona Etkisi:** Betonda erken mukavemetler üzerinde etkili olur. Nihai mukavemetlere herhangi bir etkisi olmaz veya düşürebilir.

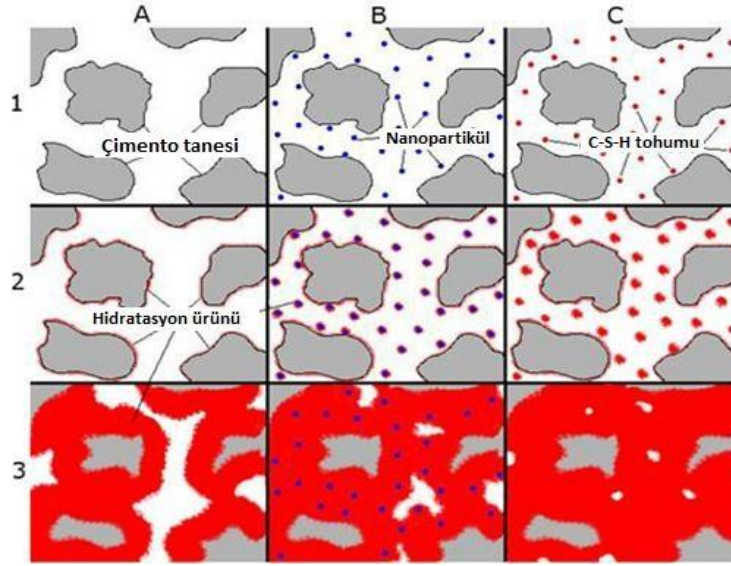
#### **Alüminat esaslı hızlandırıcılar**

Alüminat esaslı katkıları taze püskürtme betonu için tavanda kalın astar üretimi imkanı sağlar.Yüksek alkali içeriği ve sağlık tehlikesi sebebiyle yaygın olarak kullanılması sınırlıdır.Ayrıca , reaktif agrega bulunduran betonlarda alkali agrega reaksiyonunu arttırabileceği endişesi de mevcuttur.(Rixom ve Mailvanagam,2002)

#### **Sentetik C-S-H**

Çimento hidrasyonunu hızlandırmak için sentetik C-S-H tohumu gibi nanopartiküllerden de faydalanılmaktadır. Bu yöntemle, normal şartlarda kristal gelişimi için gerekli ama zaman kaybına sebep olan çekirdeklenme reaksiyonlarına ihtiyaç kalmamakta, çimento hidrasyonunun ölü evresi kısalmaktadır (Nicoleau,

2011). Nanopartikül ilavesiyle hidrasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan yöntemde, hidrasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde, çimento taneleri arasında da Şekil 2.2’de belirtildiği gibi oluşmaktadır (Alizadeh ve diğ., 2011). Sonrasında çimento hidrasyon ürünleri bu çekirdekler sayesinde kristal büyüme mekanizmasıyla oluşur. Nanopartiküllerin ilavesi sayesinde, hidrasyon ürünleri çimento tanelerinin arasında da oluşmaya başladığı için nanopartikül içermeyen bir referans karışıma göre çok daha boşluksuz bir içyapının oluşumu kısa sürede gerçekleşir. Bu şekilde, daha boşluksuz, erken yaşta yüksek basınç mukavemetine sahip çimento esaslı malzemelerin elde edilmesi mümkün olabilir (Land & Stephan, 2012)



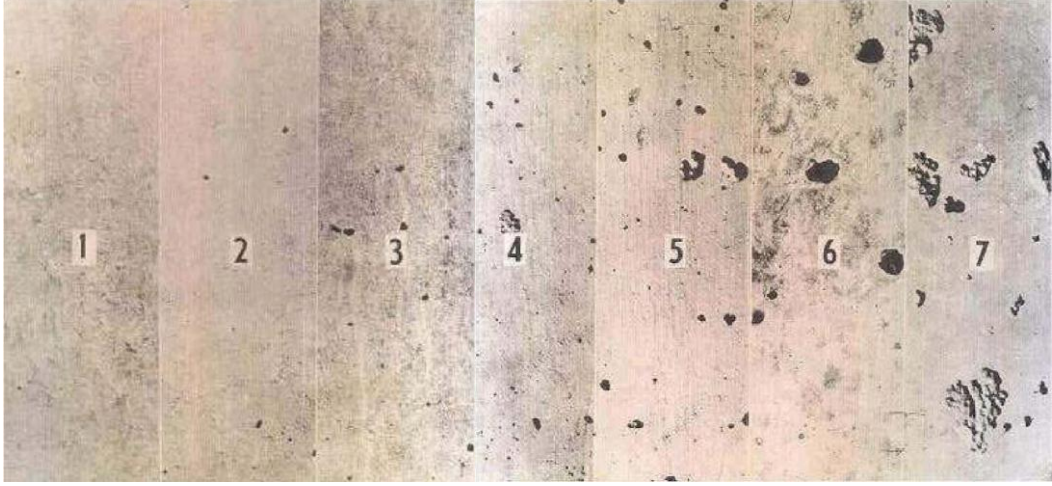
**Şekil 1.3 :** Saf çimento hamurunun (A), nanosilika ihtiva eden çimento hamurunun (B) ve sentetik C-S-H ihtiva eden çimento hamurunun (C) şematik hidrasyon gelişimi

#### 1.2.4.3 Boşluk Yapısı

KYB'nin boşluk yapısı, taze haldeki reolojik özelliklerinden, kullanılan kimyasal katkı, döküm yöntemi, kalıp şekli ve donatı miktarından önemli ölçüde etkilenir (Felekoğlu, 2003). KYB'de boşluk çapının daha büyük ama bağlantısız (izole edilmiş boşluk yapısı) olduğu sonucunu elde etmiştir. Kapiler su emme deneylerinde KYB iç yapısında su boşluklar arasında geçiş yapamadığı için standart betondaki kadar yükselmez (Boel ve diğ. 2002).

Döküm hızının yüksek olması halinde sıkışık hava boşluğu miktarının arttığı görülmüştür (Felekoğlu, 2003).

Boşluk yapısının deneysel olarak tespiti pratik değildir. Yüzey görünümünden boşluk yapısı hakkında fikir elde edilebilir. Fransız Standardı P18-503’de yüzey boşluk yapısı, Şekil 1.4 ’de görülen 7 sınıfa ayrılmıştır. Bu şablon kullanılarak yüzey görünümü sınıflandırılması yapılmaktadır. İlk 4 sınıf kaliteli yüzey görünümü olarak kabul edilmektedir. Bal peteği görünümlü boşlukların bulunduğu 5, 6 ve 7. sınıflar KYB olarak kabul edilemez (Felekoğlu, 2003).



**Şekil 1.4:** Fransız standartı P18-503’e göre yüzey boşluk yapısı

### 1.3 Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Yöntemleri

Geleneksel beton üretiminde kalite kontrol safhasında pratikte en çok kullanılan iki parametre taze betonun çökme değeri ve betonun belirli yaştaki (genellikle 28 günlük) basınç dayanımıdır. Geleneksel beton basınç dayanımına göre sınıflandırılmaktadır. KYB’de ise durum farklıdır. Basınç dayanımından çok, taze haldeki özellikleri KYB’yi tanımlamada kullanılır (Perez ve diğ., 2002)

Taze betonun kendiliğinden yerleşebilirliğinin, laboratuvar ortamında belirlenmesi ve uygulamada kontrolü için çok sayıda deney yöntemi geliştirilmiştir. Pek çok deney yöntemi geliştirilmesine rağmen, hiçbir yöntem tüm reolojik parametreleri tek başına belirleyememekte, hepsinin eksik yönleri bulunmaktadır. EFNARC(2002)’nin yaptığı çalışmalarda kendiliğinden yerleşebilirlik deneyleri işlevsellik açısından üç farklı sınıfa ayrılmıştır:

Doldurma Kabiliyeti Ölçen Deneyler: Çökme sonrası yayılma ve 50 cm’ye yayılma süresi, V-hunisi akış süresi ve Orimet süresi.

Geçiş Yeteneği Ölçen Deneyler: J-halkası, L-kutusu, U-kutusu deneyleri.

Ayrışma Direnci Ölçen Deneyler: V-hunisi akış süresi,

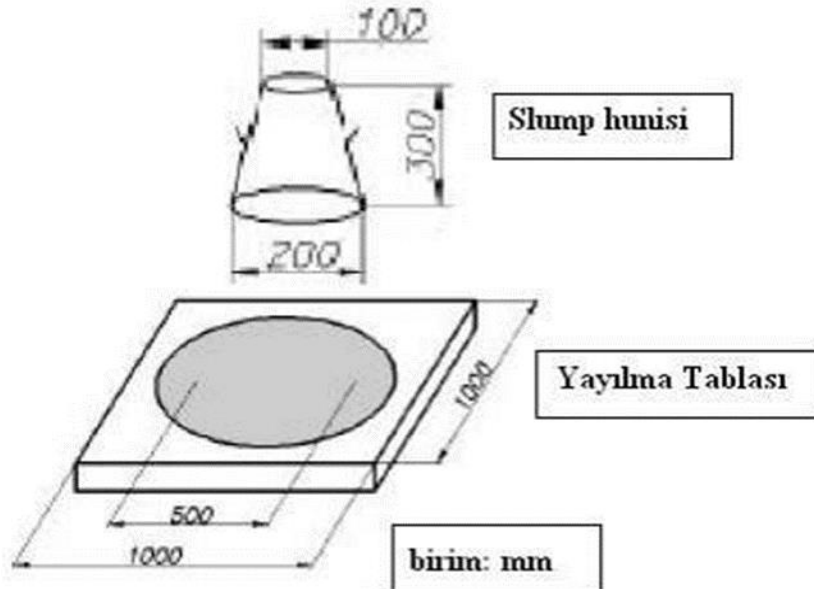
EFNARC (2002)'de standardında önerilen deney yöntemleri ve ölçtüğü kendiliğinden yerleşebilirlik özellikleri topluca Çizelge 1.8'de gösterilmiştir.

**Çizelge 1:8** EFNARC'a göre deney yöntemleri ve özellikleri

|   | Deney Metodu                    | Özellik           |
|---|---------------------------------|-------------------|
| 1 | Yayılma çapı                    | Doldurma yeteneği |
| 2 | 50 cm.'e yayılma süresi         | Doldurma yeteneği |
| 3 | J-halkası                       | Geçiş yeteneği    |
| 4 | V-hunisi akış süresi            | Doldurma yeteneği |
| 5 | 5dk. sonra V-hunisi akış süresi | Ayrışma direnci   |
| 6 | L-kutusu                        | Geçiş yeteneği    |
| 7 | U-kutusu                        | Geçiş yeteneği    |

### 1.3.1 Yayılma deneyi

Bu deney çökme (ASTM C143-90a) deneyinin bir modifikasyonudur ve akıcı kıvamlı betonlarda araştırmacıların tercih ettiği bir deneydir . Şekil 1.5'de deney aletlerinin şematik gösterimi görülmektedir.



**Şekil 1.5 :** Yayılma tablası ve hunisi boyutları

Deney yöntemi “EN 12350-8: Slump-flow test for self-compacting concrete (flow diameter test)” standardında açıklanmıştır. Klasik çökme deneyi kullanılabileceği gibi bazen ters konumda, yani geniş ağzı üstte kalacak şekilde de uygulanabilir. Alta

konulan elik plak üzerine çizilen 50 cm çaplı bir dairenin merkezine yerleştirilen koni beton ile doldurulduktan sonra yukarıya doğru çekilerek çıkartılır ve aşağıdaki lmler yapılabilir (şekil 1.6.).

- 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.
- Yayılma sona erdikten sonra oluşan dairenin birbirine dik iki çapı ölçülüp ortalaması alınarak çökme –yayılma değeri bulunur.



**şekil 1.6:** KYB’da çökme-yayılma deneyi

Deneyin yapılışı şöyle özetlenebilir: Kesik koni şeklindeki standart çökme hunisi yatay yüzeydeki yayılma tablasının merkezine yerleştirilir ve betonla doldurulur. KYB’de sıkıştırma enerjisine ihtiyaç olmadığı için, standart şişleme yapılmaz ve huni bir kap vasıtasıyla, beton serbest düşürülerek doldurulur. Huninin hidrostatik basınç etkisiyle yukarı kalkmasını ve betonun sızmasını engellemek için doldurma sırasında huniyi iyice bastırmak gerekir. Huni, doldurulduktan sonra yukarı kaldırılarak betonun yayılmasını tamamlaması beklenir. Viskozitesi yüksek karışımlarda yayılmanın tamamlanması için birkaç dakika beklemek gerekebilir (Khayat, 1995-a). Yayılma durunca birbirine dik iki ap ölçülüp deney tamamlanır.

(Ferraris, 1999). Bu aplar arasındaki fark 5 cm’den fazla ise deney tekrarlanmalıdır (Aggoun vd., 2002). Yayılma deneyinde, betonun çökerek yayılma hareketini devam ettirmesi, eşik kayma gerilmesi değerini aşmasına bağlıdır. Betonun eşik kayma gerilmesi ne kadar düşükse, beton kendi ağırlığı ile o kadar çok kp yayılacaktır ve eşik kayma gerilmesiyle kendi ağırlığının yarattığı ve yayılma süresince giderek

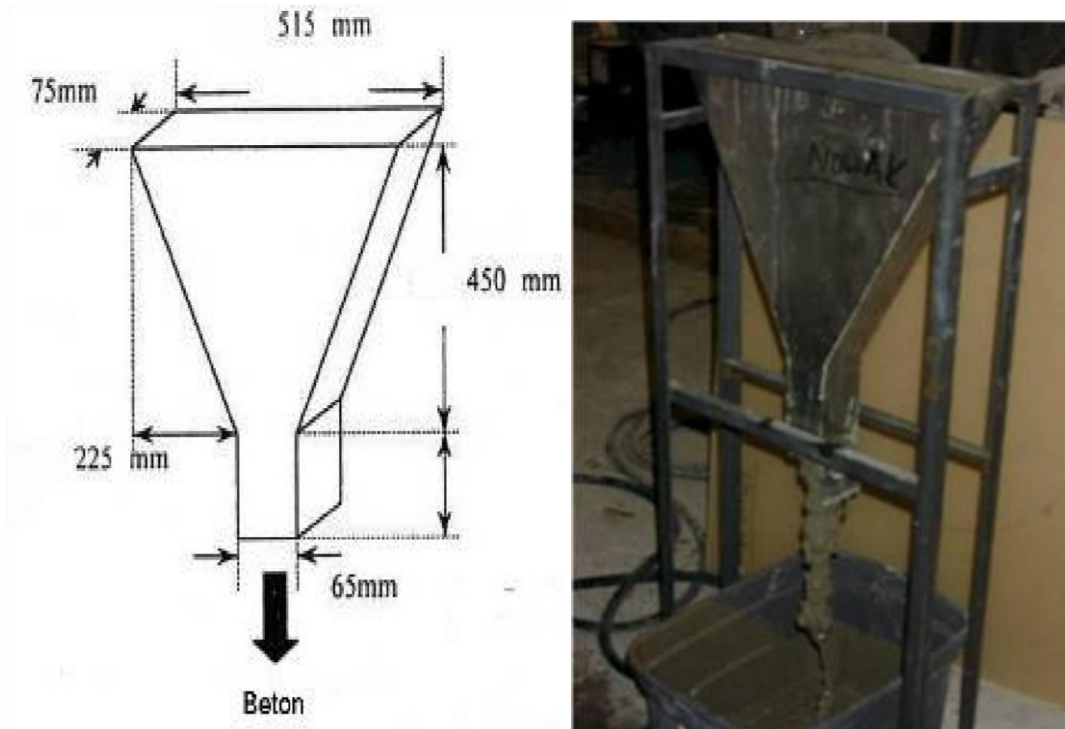
düşen gerilme eşitlenince yayılma duracaktır. Bu nedenle nihai yayılma deneyi eşik kayma gerilmesiyle ilişkilendirilebilir (Felekoğlu, 2003).

Çökme yayılma deneyinde sonucu etkileyebilecek değişkenlikler daha çok deneyi yapan kişinin kullandığı aparat ve yöntem (koni çekme hızı ve doğrultusu, yayılma tablasının malzeme sürtünme katsayısı, huni ve tablanın yüzey nem durumu), karışım oranlarındaki elde olmayan değişkenliklere (stok sahasında agrega nem değişkenliği, agrega gradasyonundaki değişkenlikler) bağlıdır.

### 1.3.2 V hunisi deneyi

V şekilli akış hunisi taze betonun dar bir aralıktan geçiş yeteneğini ve viskozitesini dolaylı yoldan ölçmek amacıyla kullanılır. Şekil 1.7’de deney aletinin şematik gösterimi görülmektedir.

Huni taze beton ile doldurulduktan sonra alt uçtaki kapak açılarak akış başlatılır. Üstten bakıldığında alttan ışık geçmeye başladığı ana kadar geçen süre ölçülür (Özkuş,2006)



Şekil 1.7 : V-hunisi boyutları ve fotoğrafı

Deneyin yapılışı sırasında beton akıyorsa yani tıkanma varsa, bunun iki nedeni olabilir; eşik kayma gerilmesi betonun ağırlığının yarattığı gerilmeden büyüktür. Bir başka tıkanma sebebi de betonun yeterli stabiliteye sahip olmaması durumunda ortaya çıkan ayrışma ile agrega tanelerinin çıkış ağzında birikerek kenetlenme





**Şekil 1.9:** J halkası deney aleti

### **1.3.5 Kısıtlanmış çökme-yayılma deneyi**

Özkul ve diğerlerince geliştirilen deney aletinde içte, alt ve üstü açık 15 cm çapında ve 30 cm yükseklikte bir silindir bulunur ve bunun hemen etrafına 12 mm çapında ve 35 mm aralıkla 14 adet çelik çubuk dikey olarak yerleştirilmiştir (Şekil 1.10). İçteki silindir beton ile doldurulduktan sonra dikey doğrultuda yukarıya doğru kaldırılmakta ve betonun çubuklar arasından geçerek yayılması sağlanmaktadır. Aletin oturtulduğu çelik plaka üzerine daha önceden çizilen 50 cm çaplı daire yardımı ile betonun başlangıçtaki hızı, toplam yayılma süresi ve toplam yayılma miktarı ölçülebilmektedir. Ayrıca çubuklar arasında kalan betondaki iri agrega konsantrasyonu ayrışmanın bir ölçüsü olarak değerlendirilebilir. Bazı betonlar geleneksel çökme yayılma konisinde belli bir yayılma verirken söz konusu alette çubuklar (donatılar) arasından geçmesi gerektiği için yayılma miktarı daha düşük kalabilmektedir. Söz konusu deney J-halka deneyine benzemektedir.



**Şekil 1.10:** Engelli yayılma deneyi aleti (Özkul ve diğ, 2006)

### 1.3.6 Elek ayırışma deneyi

İri agrega ve harç arasında ne kadar ayırışma olacağını belirlemeye yarar. Amaç KYB karışımında iri agreganın oturmasından kaynaklanan ayırışma riskini değerlendirmektir.

Taze betondan alınan 2lt'lik numune 5mm göz çaplı bir eleğin içine dökülerek 15 dakika sonunda elekten geçen miktar ölçülür (Şekil 1.11) (EN 12350-11: Sieve segregation test for self compacting concrete). Elek altına geçen miktar toplam miktara oranlanır.(EFNARC, 2005) e göre % 15 i geçmemelidir.



Şekil 1.11: Elek ayırışma deney aleti

### 1.3.7 Daldırma deneyi

Daldırma (penetration) yönteminde toplam ağırlığı 54 g olan bir silindirin taze beton içine serbest ağırlığı altında girme derinliği ölçülür (Şekil 1.12). Ayırışma direncini ölçmeye yöneliktir (EFNARC., 2005) 'e göre batma derinliği 10 mm i geçmemelidir.



Şekil 1.12: Daldırma deney aleti

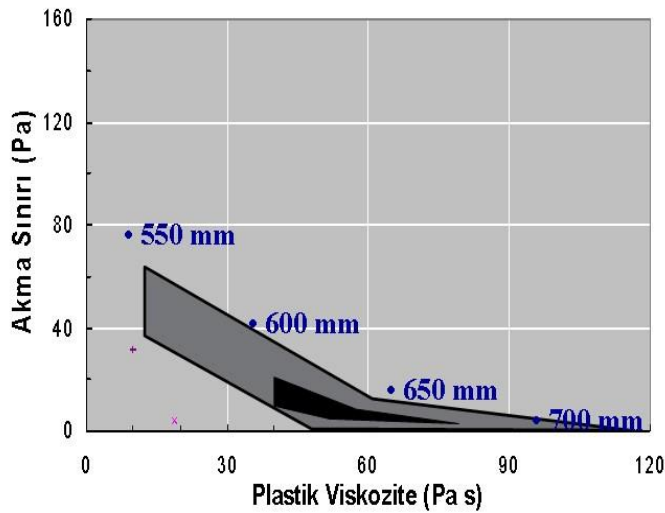
### 1.3.8 Reoloji deneyi

Beton, harç ve hamur gibi numunelerin reolojik parametreleri olan eşik kayma değeri ve plastik viskozitesini direkt olarak hesaplayabilen deneydir.

Yüksek akıcılığa sahip betonun reolojisi, davranışını tanımlayan akma sınırı ve plastik viskozite parametreleri ile açıklanabilir. Betonun harekete geçmesi için gerekli kuvvet akma sınırı, dış gerilmeler altında akmaya karşı gösterdiği direnç ise plastik viskozite olarak tanımlanmaktadır.

Akma sınırı yüksek bir beton katı ve harekete karşı dirençli, yüksek plastik viskoziteye sahip ise akıcıdır ama hareketi çok yavaştır. Eğer plastik viskozite çok düşük ise oldukça akıcıdır, ancak süspansiyon içerisinde yer alan çimento ve kum taneciklerinin bir arada tutulması oldukça zordur ve beton şiddetli bir ayrışma ve terlemeye meyillidir.

Akıcı bir betonun kararlı olabilmesi için Şekil 1.13’de verilen grafikte gri bölgeye girecek şekilde akma sınırı ve plastik viskoziteye sahip olması gerekir. Fakat bu, karışımın KYB şartlarını sağladığı anlamına gelmez. Siyah bölgede yer alan beton ise hem kararlı, hem de KYB şartlarını yerine getirmektedir (Wallevik, 2003)



Şekil 1.13: Akma sınırı ve Plastik Viskozite arasındaki ilişki

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde; üretilen betonlarda kullanılan malzemeler ve özellikleri, hazırlanan beton karışımları ve nasıl üretildikleri ile yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri detaylı şekilde açıklanmıştır.

### 2.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Kullanılan malzemeler ve bunların özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

#### 2.1.1 Çimento

Yapılan deneylerde CEMI-R 42.5 tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Çimento, Akçansa Çimento fabrikasından tedarik edilmiştir. Aşağıdaki Çizelge 2.1 te çimentonun fiziksel, kimyasal analizinin değerleri verilmiştir.

**Çizelge 2.1 :** P.Ç CEM I R 42, 5 çimentonun özellikleri

| İçerik                           | CEM I 42, 5R |
|----------------------------------|--------------|
| % SiO <sub>2</sub>               | 18.59        |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.75         |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.41         |
| % CaO                            | 63.59        |
| % MgO                            | 1.11         |
| % Na <sub>2</sub> O              | 0.49         |
| % K <sub>2</sub> O               | 0.77         |
| % SO <sub>3</sub>                | 3.39         |
| Kızdırma Kaybı                   | 3.03         |
| % Cl                             | 0.016        |
| % Serbest CaO                    | 1.56         |
| Özgül Ağırlık                    | 3.11         |
| Basınç Dayanımı (7. gün)         | 49.9 MPa     |
| Basınç Dayanımı (28. gün)        | 51.4 MPa     |

### 2.1.2 Agrega

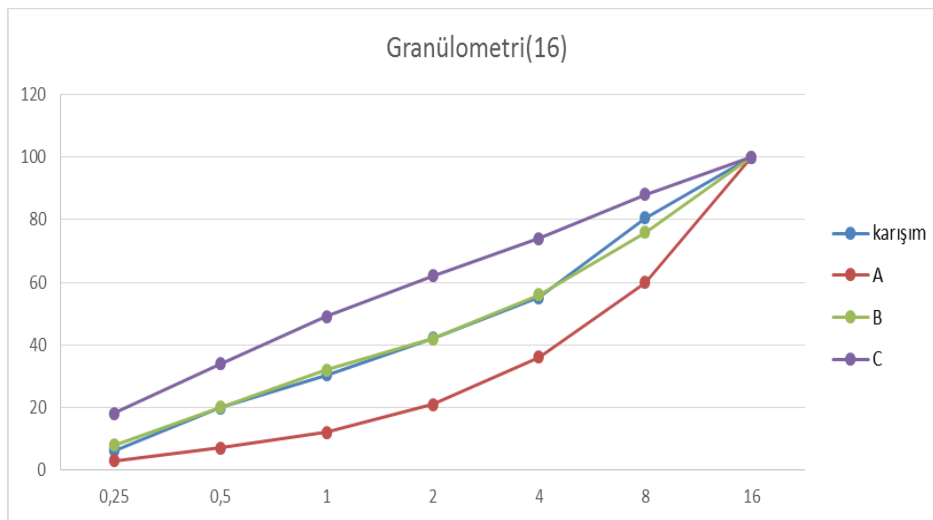
Deneysel çalışmalarda Kırmataş1,kırmakum ve doğalkum olmak üzere 3 farklı tipte agrega kullanılmıştır.

İri malzeme olarak 5-15mm arasında dağılıma sahip ve ince malzeme olarak 0-5mm arasında dağılıma sahip olmak üzere iki farklı gradasyonda agrega kullanılmıştır. 5-15 mm malzeme kırma taş , 0-5 mm malzeme doğal dere kumu ve kırma kum kullanılmış olup, özgül ağırlık ve tane boyut dağılımları Çizelge 2.2 de verilmiştir.

**Çizelge 2.2 :** Kullanılan agregaların özellikleri ve elek analiz sonuçları

|                                  | Kırmataş 1 | Kırma kum | Doğal kum | Karışım |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|---------|
| Özgül Ağırlık gr/cm <sup>3</sup> | 2,68       | 2,68      | 2,62      |         |
| Elek açıklığı mm                 | Geçen %    | Geçen %   | Geçen %   | Geçen % |
| 16                               | 100,00     | 100,00    | 100,00    | 100,00  |
| 8                                | 52,25      | 99,00     | 100,00    | 80,60   |
| 4                                | 0,85       | 82,56     | 100,00    | 55,11   |
| 2                                | 0,55       | 42,85     | 96,88     | 42,14   |
| 1                                | 0,50       | 20,70     | 80,00     | 30,41   |
| 0,5                              | 0,40       | 13,30     | 52,60     | 19,93   |
| 0,25                             | 0,34       | 8,75      | 11,57     | 6,23    |
| İncelik modülü                   |            |           |           | 3,7     |

Karışımın tane boyut dağılımları belirlenirken B16 eğrisi referans kabul edilmiştir.Agrega karışımı %40 oranında kırmataş,%30 oranında kırma kum ve %30 oranında doğal kum kullanılarak elde edilmiş ve Şekil 2.3 de A16, B16 ve C16 referans eğrileriyle birlikte verilmiştir.



**Şekil 2.1:** Agregalar karışımının granülometri eğrisi

### 2.1.3 Yüksek fırın cürufu

Deneyleerde kullanılan YFC, İskenderun demir çelik fabrikasından elde edilmiştir.Kimyasal analiz sonuçları Çizelge 2.3 te verilmiştir

**Çizelge 2.3 : YFC nin analiz sonuçları**

| İçerik                                   | YFC     |
|------------------------------------------|---------|
| % SiO <sub>2</sub>                       | 42.01   |
| % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 10.21   |
| % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 0.99    |
| % CaO                                    | 36.58   |
| % MgO                                    | 5.82    |
| % Na <sub>2</sub> O                      | -----   |
| % K <sub>2</sub> O                       | -----   |
| % SO <sub>3</sub>                        | 0.33    |
| Kızdırma Kaybı                           | 1.97    |
| % Cl                                     | 0.016   |
| % Serbest CaO                            | 1.56    |
| Özgöl Ağırlık                            | 2.90    |
| Özgöl yüzey (blaine) cm <sup>2</sup> /gr | 5880    |
| Basınç Dayanımı (7. gün)                 | 50.3MPa |

### 2.1.4 Akışkanlaştırıcı katkı

Karışımların hepsinde akışkanlaştırıcı katkı olarak BASF firmasının ürettiği polikarboksilik eter esaslı ‘ glenium SKY 608’ kullanılmıştır.Teknik özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir.

**Çizelge 2.4 : Glenium SKY 608 teknik özellikleri**

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

### 2.1.5 Su

Beton karışımlarının tamamında ve kür havuzlarında ph değeri 7 olan şebeke suyu kullanılmıştır.

### 2.1.6 Sentetik C-S-H

BASF Firmasının ürettiği X-SEED-100 isimli sentetik C-S-H partikülleri süspansiyon şeklinde kullanılmıştır.X-SEED 100 ‘ün teknik özellikleri çizelge 2.5 de verilmiştir

**Çizelge 2.5 : X-SEED 100 ‘ün teknik özellikleri**

| Görünüm                                   | Beyaz/nanopartiküller ve nitratlar içeren<br>Kokusuz süspansiyon |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 20°C de Yoğunluk                          | 1,135 g/cm <sup>3</sup>                                          |
| 20° C de pH değeri                        | 11                                                               |
| Alkali içeriği(NA <sub>2</sub> O’ya denk) | <3,0 M %                                                         |
| Klorit iyonu içeriği                      | <0,1 M %                                                         |

## 2.2 Beton Karışımları

KYB tasarım yöntemleri başlığı altında açıklanan bilgiler ışığı altında hazırlanan ön karışımlarla yapılan deneme dökümleri sonucunda , kendiliğinden yerleşebilirlik özelliklerini sağlayan betonun malzeme karışım oranları tespit edilmiş ve buna göre deney karışımları hazırlanmıştır. Su/toz oranı hacimce 0, 9-1.15 arasında ve kum/iri agrega değeri ağırlıkça 1.50 mertebesinde tutulması hedeflenmiştir. Çimento tipi CEM I 42,5R ve dozajı 500 kg/m<sup>3</sup> olarak seçilmiştir Su 185 litre olarak seçilmiş ve karışımların tamamında bu miktar sabit olarak kullanılmıştır.Deney karışımlarında iri agrega(4-16 mm) % 40,kırma kum %30 ve doğal kum %30 oranında kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı olarak toz malzemenin % 0,8 ile 1 i arasında SKY 608 isimli polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Referans betonu olarak hazırlanan 1.grup karışımında çimento 500 kg/m<sup>3</sup> kullanılmıştır.Sonrasındaki gruplarda çimento ağırlığının %20 si eksiltilerek, sırası ile eksiltelen miktarın yerine ağırlıkça ,1 : 1 , 1 : 1,25 ve 1 : 1,5 olacak şekilde yüksek fırın cürufu içeren 4 farklı karışım hazırlanmış ve bu 4 karışımın herbirine

toz (ince) malzemenin ağırlıkça %2 si oranında sentetik C-S-H eklenerek 4 karışım daha hazırlanmıştır. Karışımlara ait bilgiler Çizelge 2.6 da verilmiştir.

**Çizelge 2.6 : Karışımlara ait malzeme miktarı**

|                    |           | 1.grup | 2.grup | 3.grup | 4.grup | 5.grup | 6.grup | 7.grup | 8.grup |
|--------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Çimento            | kg/m3     | 500    | 500    | 300    | 300    | 300    | 300    | 300    | 300    |
| YFC                | kg/m3     | 0      | 0      | 200    | 200    | 250    | 250    | 300    | 300    |
| Su                 | kg/m3     | 185    | 185    | 185    | 185    | 185    | 185    | 185    | 185    |
| Kırmataş 1         | kg/m3     | 684,7  | 684,6  | 679,9  | 679,9  | 661,4  | 661,4  | 643,0  | 642,9  |
| K. kum             | kg/m3     | 513,5  | 513,5  | 509,9  | 509,9  | 496,1  | 496,0  | 482,2  | 482,2  |
| Doğal kum          | kg/m3     | 502,0  | 502,0  | 498,5  | 498,5  | 485,0  | 484,9  | 471,4  | 471,4  |
| S.Akışkanlaştırıcı | %         | 1,00   | 1,00   | 0.95   | 0.95   | 0.95   | 0.95   | 0,95   | 0.95   |
| SKY608             | kg/m3     | 5      | 5      | 4,75   | 4,75   | 5,22   | 5,22   | 5,70   | 5,70   |
| X-SEED -100        | kg/m3     | 0      | 10     | 0      | 10     | 0      | 11     | 0      | 12     |
| Vhamur             | dm3       | 346    | 346    | 351    | 351    | 368    | 368    | 385    | 385    |
| Su/toz             | hacimce   | 1,15   | 1,15   | 1,12   | 1,12   | 1,01   | 1,01   | 0,92   | 0,92   |
| Su/toz             | ağırlıkça | 0,37   | 0,37   | 0,37   | 0,37   | 0,34   | 0,34   | 0,31   | 0,31   |
| T.birim ağırlık    | ağırlık   | 2390,2 | 2400,1 | 2378,1 | 2388,0 | 2382,4 | 2393,3 | 2386,7 | 2398,5 |

Çizelgeden görüleceği üzere YFC nun işlenebilirliğe olumlu katkısından dolayı referans betona göre daha düşük oranda akışkanlaştırıcı katkı aynı yayılma hedefi için (70±3cm) yeterli gelmiştir.

### 2.3 Deneylerin Yapılışı

Detayları Bölüm1.3 te anlatılan taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri Çizelge 2.7’de, deneylerde kullanılan örnek tipi, boyutları ve sayıları Çizelge.2.8’de verilmiştir.

**Çizelge 2.7 : Taze ve sertleşmiş beton deneyleri**

| Taze Beton Deneyleri                                                                                                                                                                                       | Sertleşmiş Beton Deneyleri | yaş    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------|
|                                                                                                                                                                                                            |                            |        |
| Çökme-yayılma deneyi<br>T50 süresi deneyi<br>V-hunisi akış deneyi<br>Hava %’si ölçümü<br>Birim Hacim Ağırlık (BHA)<br>Batma deneyi<br>Elekte ayrışma deneyi<br>Engelli yayılma deneyi<br>Viskometre deneyi | Basınç dayanımı            | 9 saat |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 1 gün  |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 3 gün  |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 7 gün  |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 28 gün |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 90 gün |
|                                                                                                                                                                                                            | Kılcallık deneyi           | 7 gün  |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 28gün  |
|                                                                                                                                                                                                            |                            | 90 gün |

**Çizelge 2.8 : Deneysel çalışmada kullanılan örnek tipi, boyutları ve sayıları**

| <b>Deney</b>               | <b>Numune tipi</b> | <b>Numune Boyutları</b> | <b>Numune adedi</b> | <b>Toplam adet</b> |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
| Basınç Dayanımı (1 günlük) | Küp                | 10x10x10 cm             | 6                   | 48                 |
| Basınç Dayanımı (3 günlük) | Küp                | 10x10x10 cm.            | 6                   | 48                 |
| Basınç Dayanımı(7 günlük)  | Küp                | 10x10x10 cm             | 6                   | 48                 |
| Basınç Dayanımı(28 günlük) | Küp                | 10x10x10 cm.            | 6                   | 48                 |
| Basınç Dayanımı (90günlük) | Küp                | 10x10x10 cm             | 6                   | 48                 |
| Kılcallık deneyi 10 günlük | Prizma             | 7x7x28 cm               | 1                   | 8                  |
| Kılcallık deneyi 28 günlük | Prizma             | 7x7x28 cm               | 1                   | 8                  |
| Kılcallık deneyi 90 günjük | Prizma             | 7x7x28 cm               | 1                   | 8                  |

Toplam 8 farklı betondan alınan numuneler kalıplarından çıkarıldıktan sonra 8°C ve 20°C de iki farklı su küründe saklanmıştır.

Beton üretiminde İ.T.Ü Yapı Malzemesi Labaratuvar'ında bulunan 50lt hacimli düşey eksenli beton mikseri kullanılmıştır.Üretim işlemi bütün karışımlar için şu sırayla gerçekleştirilmiştir.

- İlk önce agregaların tamamı miksere konulup 30 sn boyunca kuru karıştırma yapılmıştır.
- Sonraki 60 sn boyunca karma suyu eklenerek yavaş yavaş karıştırma devam etmiştir.Karıştırma tamamlanınca çimento, varsa cüruf ilave edilip karışım tekrar başlamıştır.
- Karıştırma esnasında karma suyunun % 80 'i karışıma ilave edildikten sonra süperakışkanlaştırıcı ve karma suyun geri kalanı beraberce karışıma ilave edilerek 8 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir.
- Sentetik C-S-H katılması gereken gruplara yukardaki işlem sırasına uyulduktan sonra en son sentetik C-S-H süspansiyonu eklenmiş ve 5 dakika daha karıştırma işlemi devam etmiştir.
- Gözlem sonucu yeterli işlenebilirliğe sahip olduğuna kanaat getirilince karıştırma işlemine son verilerek mikserin kazanından yeterli miktarda beton alınarak taze beton deneyleri için yapılmıştır.

Taze beton deneyleri yapılırken aynı zaman da yağlanmış kalıplara geri kalan beton doldurularak priz almaları beklenmiştir.Bu deneylerin tamamı 8°C de ortam sıcaklığındaki labaratuvar şartlarında gerçekleştirilmiştir.

9 saat beklendikten sonra her bir grup karışıma ait kalıplardan 3 er tanesi sökülerek basınç dayanım testi uygulanmıştır.Diğer kalıplar 24 saat sonunda sökülerek her grup karışıma ait numunelerin yarısı 8°C de soğutulmuş suya diğer yarısı da 20°C de ısıtılmış ve bu sıcaklıkta sabit tutulan su havuzlarına konmuştur.

Karışımların yapıldığı mikser,kalıplar ve kür havuzları sırasıyla Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4 te gösterilmiştir.



**Şekil 2.2:**Beton mikseri



Şekil 2.3: 10x10x10 cm lik çelik kalıplar



Şekil 2.4: Kür havuzları

### 2.3.1 Taze beton deneyleri

#### 2.3.1.1 Yayılma deneyi ve t50 süresinin ölçümü

KYB nin kendi ağırlığıyla yayılma kabiliyetini ölçmek için aşağıdaki işlemler yapıldı.

- Taban sac levhası düzgün bir zemine yerleştirilip yüzeyi nemlendirildi
- Abrams konisi, dar çapı aşağı gelecek şekilde ,üzerinde 50 cm daire çizili olan taban levhasının tam merkezine oturtuldu.
- Daha sonra huninin ağzı levhaya iyice bastırılarak huni beton ile tamamen dolduruldu ve üstü tesviye edildi
- 30 sn sonra koni sarsılmadan belli bir mesafeye yukarı çekildi beton akmaya başladı.
- Koni havaya kaldırıldığı anda kronometreye basılarak 50 cm çapındaki çizgiye ulaşınca kadar geçen süre tespit edildi.
- Betonun yayılması durunca betonun çapı ölçüldü .daha sonra ölçüme dik noktadan bir ölçüm daha yapıldı.
- Bu çapların ortalaması betonun yayılma değeri olarak kaydedildi.
- Yayılma esnasına gözlem yapılarak betonda su kusması ve ayrışma olup olmadığı not edildi

Deneyin için kullanılan aletin resmi Şekil 2.5 te gösterilmiştir.



**Şekil 2.5:**Çökme yayılma konisi ve tablası

### 2.3.1.2 V hunisi akış süresi ölçümü

KYB'nin dar bir kesitten kendi ağırlığı altında geçiş yeteneğini ölçmek amaçlı yapılan bir deneydir. Deney şu şekilde yapıldı:

- V şeklinde dikdörtgen kesitli huni (şekildeki) ve tabanındaki kapak temizlendikten sonra nemlendirildi.
- Alt kapak kapatıldıktan sonra, karılması tamamlanan betondan yaklaşık 12 lt alınarak yavaşça huninin üst seviyesine kadar tamamen doldurulup üstü tesviye edildi.
- Huninin altına yeterli büyüklükte bir kap yerleştirildi.
- Huninin alt kapağı açıldı ve beton akmaya başladığı anda kronometre çalıştırıldı.
- Huninin üstünden bakıldı ve alttaki delikten ışık görüldüğü anda kronometre durduruldu. Toplam süre akış süresi olarak kaydedildi.

Deneyde kullanılan alet şekil 2.6 te gösterilmiştir.



**Şekil 2.6:** V hunisi deneyi

### **2.3.1.3 Elekte ayrışma deneyi**

İri agrega ile harç arasında ne kadar ayrışma olacağını belirleme temeline dayanır. Amaç KYB karışımında iri agreganın ayrışma riskini değerlendirmektir.

Deney (EN 206-9 ,2010) standardına göre şöyle yapıldı:

- KYB üretildikten hemen sonra yaklaşık 2 lt lik bir kaba beton konup üstü kapatıldı.
- 15 dakika beklendikten sonra kabın ağzı açıldı ve terleme kontrol edildi.
- Kabın içindeki beton altında bir kap olan 5 mm açıklıklı bir eleğe 50 cm yüksekten döküldü.
- 120 sn beklendi.
- Eleğin altına geçen beton miktarı tartılarak bulundu.
- Eleğin altına geçen beton ağırlığı ,toplam eleğin üstüne dökülen beton ağırlığına bölünerek bulunan rakam ayrışma oranı olarak kayıt edildi.

### **2.3.1.4 Hava miktarı deneyi**

Taze haldeki hapsolmuş betonun hava içeriğini belirlemek ve standartlaştırmak için farklı metotlar vardır. Bütün metotlar toplam hava içeriğini ölçerken hapsolmuş hava ile sürüklenmiş hava arasında ayırım yapmamaktadır. Testler, hava kabarcıkları ve aralıklarının boyutları ve boyut dağılımlarını göstermez. Sertleşmiş betonda dayanıklılığın ve donma-çözülme direncinin artması sürüklenmiş havanın boyutu ve dağılımına bağlıdır. Hava içeriği için genelde kullanılan metodlar:

- Basınç metodu
- Hacimsel metod

Bu çalışmada basınç metoduyla çalışan Şekil 2.7 te gösterilen havametre aleti kullanılmıştır.

KYB karışımları havametrenin 7 litrelik haznesine herhangi bir sıkıştırma ve şişlemeye tabi tutmadan boşaltıldı. Hazne tamamen dolunca üstü tesviye edilerek kapağı sıkıca kapatıldı. Kullandığımız havametre aletinde susuz ve sulu metod seçeneklerinden susuz metod tercih edildi. Üstteki el pompası vasıtasıyla ,ibre göstergenin başlangıç çizgisine gelene kadar hava basıncı uygulandı. Daha sonra

hava alma koluna basılarak fazla havanın dışarı çıkması sağlandı.Bu esnada ibrenin hareket ederek sabitlendiği değer hava yüzdesi olarak kayıt edildi.



Şekil 2.7: Havametre aleti

#### 2.3.1.5 Birim ağırlık deneyi

Bu deneyde taze haldeki betonun birim ağırlığı ölçülür.Bunun için havametre aletinin 7 litrelik haznesinden faydalanıldı.Hazne boşken tartılarak ağırlığı tespit edildi. Sonra hazne tamamen KYB ile doldurulup üstü tesviye edildi ve bu şekilde tekrar tartıldı.

Bu ağırlıkların farkından taze betonun ağırlığı bulundu.bu değer haznenin hacmine bölünerek betonun birim ağırlığı hesaplandı ve kayıt edildi.

#### 2.3.1.6 Viskometre deneyi

Viskometre aleti toplamda 28 dm<sup>3</sup> hacminde dış silindirin iç çapı 290mm iç silindirin dış çapı 200 mm boyutlarındadır.Tork ölçümü senasındaki sapmaları önlemek için dış silindirin üst kenarından 40mm aşağıdan başlayarak silindir tabanına kadar kesintisiz devam eden eni 20mm kalınlığı 5mm olan 16 adet kanatla donatılmıştır.Hazırlanan taze haldeki KYB'den viskometrenin haznesine yaklaşık 22 lt konulmuş.hazne sarsılmadan makineye yerleştirilmiştir.Bilgisayar programının başlat imgesine basılarak makine çalıştırılmıştır.İç silindir hazneye doğru aşağı

yönde hareket etmiş ve betonun içine tamamen girmiştir. Aynı anda silindir hazne 0,6 rps (saniye başına tur sayısı) hızından 0.09 hızına kadar 5 aşamada dönmeye başlamıştır. Dönüş esnasında her dönme hızı için iç silindirin 5 sn boyunca ölçtüğü 50 adet moment değerinin ortalaması ölçüm değeri olarak kabul edilmektedir. Deney sonunda her dönme hızına karşılık gelen moment değerleri grafik üzerinde işaretlenmiştir. Grafikteki noktalara en yakın geçen doğru uzatılarak dönme hızının sıfır olduğu noktada doğrunun moment eksenini kestiği değer belirlenmiştir. Bu değere kayma eşiği adı verilir. Ayrıca doğrunun eğimi ise viskozite katsayısını vermektedir. Betonun zaman içindeki kıvam kaybını belirlemek amacıyla her 15 dakikada bu işlem tekrarlanmıştır. Deneyde kullanılan alet Şekil 2.8'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.8:** Viskometre aleti

### **2.3.2 Sertleşmiş beton deneyleri**

#### **2.3.2.1 Basınç dayanımı deneyi**

Serbest basınç deneyleri, BESMAK marka, 300 ton kapasiteli ve dijital göstergeli, yüksekliği farklı numune boyutlarına göre ayarlanabilir hidrolik beton presisi ile yapılmıştır (Şekil 2.9). Deneylerde kullanılan yükleme hızı küp numuneler için 0,6 MPa/sn'dir. (TS EN 12390-3, 2003)

10x10x10 cm boyutlu küp deney numunelerine tek eksenli basınç deneyi 9 saat, 1, 3, 7, 28, 90. günlerde olmak üzere 6 farklı yaşta uygulanmıştır. Örnekler 24 saat kalıplarda laboratuvar sıcaklığında (8°C) bekletildikten sonra ortalama sıcaklığı 20°C ve 8°C olan iki ayrı kür havuzunda saklanmışlardır. Numuneler basınç dayanım deneyi yapılmadan 1 saat önce kürden çıkarılıp kuru bezle yüzeyleri silinip, odada bekletilerek, kurutulmuşlardır. Bütün karışımların örneklerinde aynı koşul yerine getirilerek, numune içinde meydana gelebilecek hidrostatik basınç etkisi eşitlenmeye çalışılmıştır.



**Şekil 2.9:** Basınç deneyi aleti

### 2.3.2.2 Kılcallık deneyi

Betonun geçirimsizliği hakkında bilgi elde etmek için yapılan testlerden biridir. Betonun sahip olduğu kılcallık katsayısı ne kadar ne kadar düşüğe o kadar geçirimsiz olduğunu gösterir. Deney (ASTM C 1585-13, 2013)'e göre şu şekilde yapılmıştır:

- Deney günü gelmiş numunelerde iç kısımlar betonu daha iyi temsil ettiği için prizmatik numune 3 eşit parçaya kesilip 70°C deki etüvde sabit ağırlığa gelene kadar bekletilir.
- Etüvden çıkarılan numuneler oda sıcaklığına geldikten sonra su emilecek yüzeye yakın kenarlarına parafin sürülür.

- Bir kabın içine ızgara yerleştirilip su seviyesi ızgara yüzeyini 3-4 mm geçecek şekilde doldurulur.
- Numunelerin kuru ağırlıkları ölçülür.
- Kenarları parafinli olan yüzeyler ızgaranın üzerine yerleştirilir.
- Numuneler suyla temas ettiği anda kronometre başlatılır ve 1,4,9,16. dakika şeklinde sayıların karesinde herbir numunenin ağırlığı tartılır.
- Ağırlık artışı numunenin yüzey alanına bölünüp ölçüm anındaki saniyelerin karekökü ile bir grafik oluşturulur.Şekil de kılcallık grafiği mevcuttur.
- Bu grafiğin eğimi ile kılcallık katsayısı bulunur

Kılcallık katsayısı aşağıdaki denklemle hesaplanır. **(2.1)**

$$q=k\sqrt{t} \quad (2.1)$$

q : birim alandan emilen suyu,t süreyi ,k kılcallık katsayısını ifade eder.



### 3. DENEY SONUÇLARI

Deneylemlerden elde edilen sonuçlar, deney türüne göre aşağıda verilmiştir

#### 3.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Deneysel çalışmalar bölümünde tarif edilen deneyler neticesinde 8 farklı karışıma ait KYB 'lerin taze haldeki özellikleri belirlenmiştir. Çizelge 3.1 de sonuçlar sunulmuştur.

**Çizelge 3.1:** Karışımların taze beton deney sonuçları

| Deney yöntemi                               | 1.grp<br>500Ç        | 2.grp<br>500Ç+<br>C-S-H | 3.grup<br>300Ç+<br>200YFC | 4.grup<br>300Ç+<br>200YFC+<br>C-S-H | 5.grup<br>300Ç+<br>250YFC | 6.grup<br>300Ç+<br>250YFC+<br>C-S-H | 7.grup<br>300Ç+<br>300YFC | 8.grup<br>300Ç+<br>300YFC+<br>C-S-H |
|---------------------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| Ortam sıcaklığı                             | 8°C                  | 8°C                     | 8°C                       | 8°C                                 | 8°C                       | 8°C                                 | 8°C                       | 8°C                                 |
| Yayılma tablası<br>(dmaks)                  | 67cm                 | 70cm                    | 73cm                      | 72cm                                | 76 cm                     | 78cm                                | 71cm                      | 72 cm                               |
| T50 süresi                                  | 5sn                  | 4sn                     | 5sn                       | 6sn                                 | 5sn                       | 5sn                                 | 8sn                       | 8 sn                                |
| V hunisi                                    | 8 sn                 | 9sn                     | 10 sn                     | 11 sn                               | 9 sn                      | 8 sn                                | 15 sn                     | 12 sn                               |
| Donatılı yayılma<br>(dmaks)                 | 65cm                 | 72cm                    | 75cm                      | 80 cm                               | 80 cm                     | 82cm                                | 70 cm                     | 72cm                                |
| T50 süresi (Donatılı<br>yayılmada)          | 8 sn                 | 4 sn                    | 6 sn                      | 6 sn                                | 5 sn                      | 6 sn                                | 10 sn                     | 9 sn                                |
| Islak eleme<br>(elek altına<br>geçen/top.m) | 113/26<br>33<br>%4,2 | 215/3009<br>% 7,1       | 119/2750<br>% 4,3         | 212/2978<br>% 7,1                   | 225/3014<br>% 7,4         | 128/2978<br>% 4,2                   | 98/2750<br>% 3,5          | 110/2800<br>%3,6                    |
| Batma deneyi                                | 4 mm                 | 6 mm                    | 5mm                       | 6mm                                 | 5mm                       | 6mm                                 | 3mm                       | 4mm                                 |
| D.yayılmada ortada<br>kalan kısım yüzdesi   | 28                   | 29                      | 27                        | 28                                  | 28                        | 27                                  | 30                        | 29                                  |
| Hava miktarı %                              | 1,6                  | 1,6                     | 1,5                       | 1,5                                 | 1,5                       | 1,5                                 | 1,6                       | 1,6                                 |
| B.Ağırlık gr/cm3                            | 2,41                 | 2,41                    | 2,39                      | 2,38                                | 2,37                      | 2,36                                | 2,36                      | 2,35                                |
| viskometre (kayma<br>eşiği )                | 5,4Pa                | 4,9<br>Pa               | 6,8<br>Pa                 | 6,0<br>Pa                           | 5,8<br>Pa                 | 4,4<br>Pa                           | 7,04<br>Pa                | 10,04<br>Pa                         |
| Viskometre(viskozite<br>katsayısı )         | 24,20<br>Pa.s        | 22,68<br>Pa.s           | 27,9<br>Pa.s              | 26,21<br>Pa.s                       | 39,58<br>Pa.s             | 40,99<br>Pa.s                       | 59,18<br>Pa.s             | 61,09<br>Pa.s                       |

KYB lerin birim hacimlerindeki su miktarı sabit tutulmuş, buna karşılık akışkanlaştırıcı oranı değiştirilerek istenilen özelliklere sahip olması sağlanmıştır.

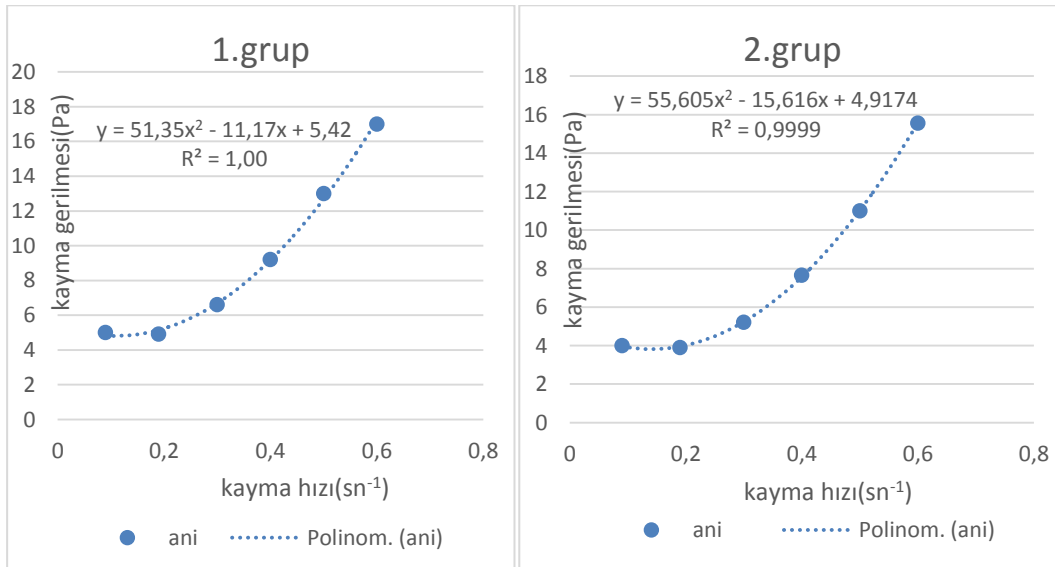
Hedeflenen yayılma olan  $70 \pm 3$  cm çapına 8 farklı karışımda da ulaşılmıştır. 3. Grup karışımında YFC ikame edilince daha az akışkanlaştırıcı katılarak daha fazla yayılma sağlanmıştır. Bu durum çalışmamızda kullanılan YFC nin işlenebilirliğe olumlu katkısını göstermektedir.

Sentetik C-S-H ilave edilen karışımlarda kıvam kaybı olmamış , aksine akışkanlık az da olsa artmıştır. Bunun sebebi beton dökümünün  $8^{\circ}\text{C}$  gibi soğuk bir ortamda yapılması ve sentetik C-S-H'ın içerdiği ilave su miktarı olabilir.

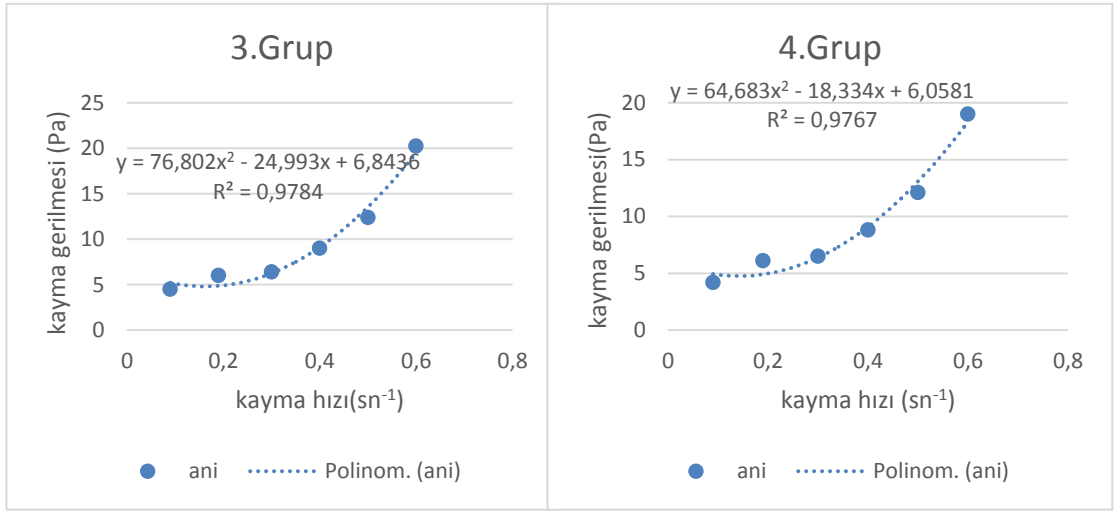
5. ve 6. grup karışımlarda 1, 2, 3. ve 4. gruplara nazaran yayılma çapları bir miktar artmış ve V hunisi akma süreleri azalmıştır. Bunun sebebinin de YFC ikame oranının artması sebebiyle hamur hacminin artması, bu sayede agregaların daha fazla hamurla çevrelenmesi , agregaların birbirlerine sürtünmesini azalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

7 ve 8. Gruplarda ise 5. ve 6. gruplara göre yayılma çapları bir kaç cm azalmış , yayılma süreleri de bir miktar artmıştır. Bunun sebebinin de her karışımda su miktarının sabit olması dolayısıyla su/toz oranının en düşük bu karışımlarda olmasına bağlanabilir.

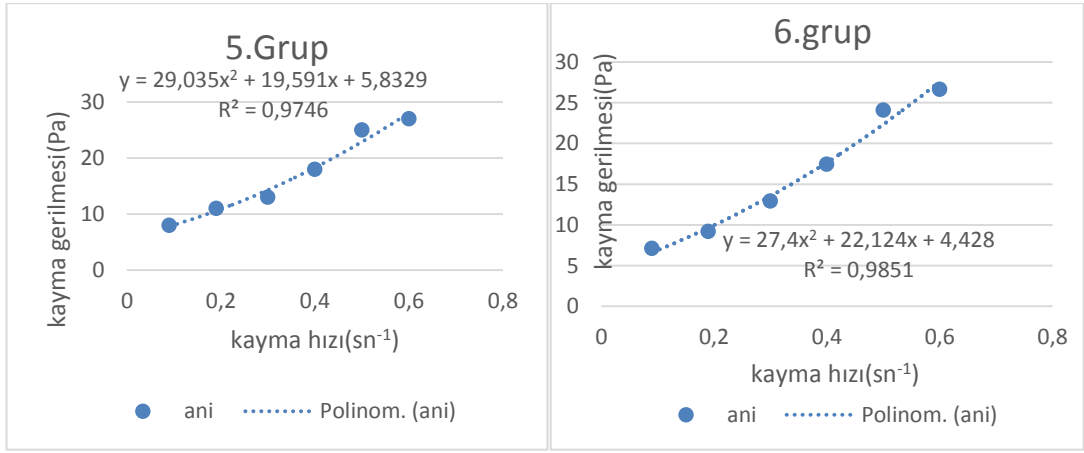
Viskometre aletiyle yapılan ölçümler sonucunda her farklı karışım grubu için ani ve 60 dakika sonra elde edilen , viskozite katsayısı ve kayma eşiği değerleri grafikleri Şekil 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4 de verilmiştir.



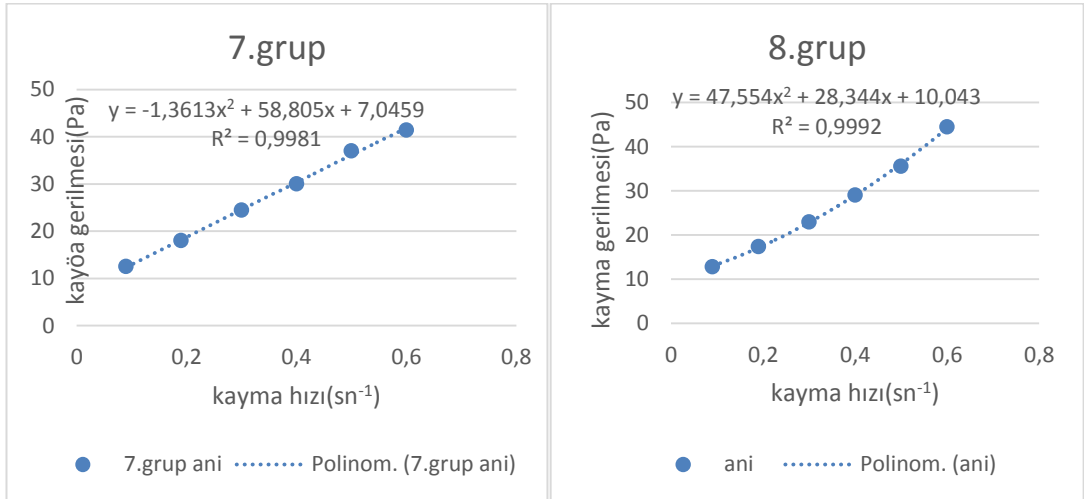
**Şekil 3.1 :** 1 ve 2.grup karışımın viskometre sonuç grafiği



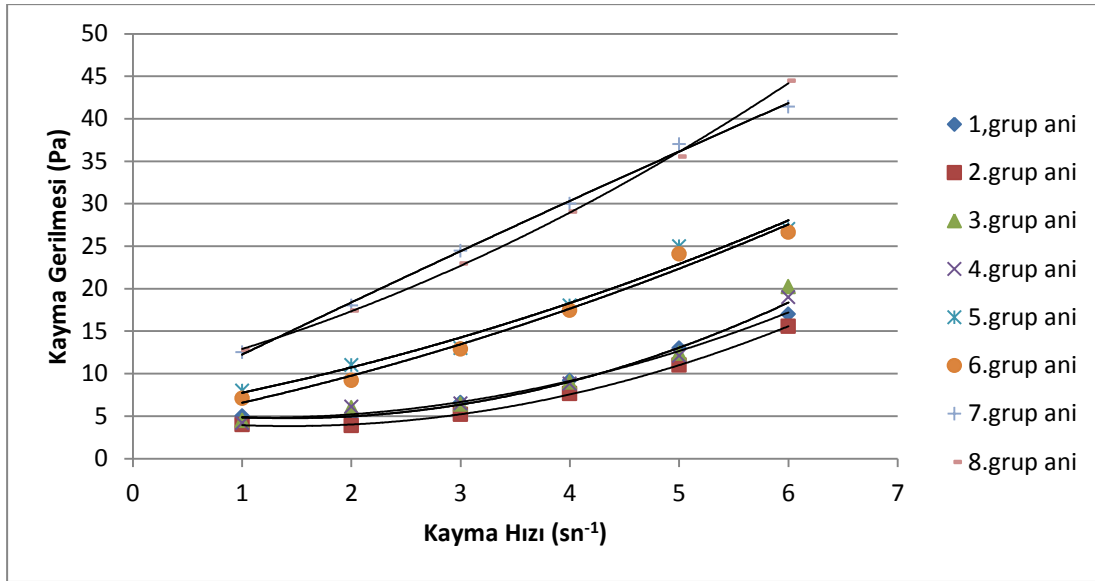
**Şekil 3.2 :**3 ve 4.grup karışımın viskometre sonuç grafiği



**Şekil 3.3 :**5 ve 6.grup karışımın viskometre sonuç grafiği



**Şekil 3.4 :**7 ve 8.grup viskozite deney sonuç grafiği



**Şekil 3.5 :**Tüm grupların kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği

Grafiklerde (y) fonksiyonundaki sabit değer kayma eşiğini göstermektedir.Yani kayma hızının sıfır olduğu noktadaki kayma gerilmesi kayma eşiğine ( $\tau_0$ ) tekabül etmektedir. Dilatant davranış gösteren, yani kayma hızı ile kayma gerilmesi arasındaki ilişki doğrusal olmayan ve hız arttıkça viskoziteninde arttığı KYB karışımlarında viskozite katsayısının hesaplanması için grafiğe eğilim çizgisi uygulanarak doğrunun eğiminden viskozite katsayıları ( $\mu$ ) hesaplanmıştır.Bu grafikler Ekler bölümünde Şekil EkA1,2,3,4,5,6,7,8 de gösterilmiştir.

Viskozite katsayılarını kıyasladığımızda YFC ikame edilmeye başlandığından itibaren viskozite katsayıları artmaya başlamış en fazla ikame oranına sahip olan 7 ve 8.grupta maksimum seviyeye çıkmıştır.Bu da göstermektedir ki hamur hacmi arttıkça viskozite katsayısı yükselmekte ve ayrışma riski azalmaktadır.Ayrıca sentetik C-S-H ilave edilen karışımlarda ani ölçülen viskozite katsayısı ve akma eşik değerlerinin bir miktar düşmüş olduğu gözlenmektedir.Ancak 60.dakika da ki sonuçlara bakıldığında ise sentetik C-S-H ilavesinin viskozite katsayısı ve kayma eşiklerinde bir miktar artışa sebep olduğu görülmektedir.Bu ise bir miktar kıvam kaybı anlamına gelmektedir.

### 3.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

#### 3.2.1 Eksenel Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Çizelge 3.2 de basınç deney sonuçları topluca verilmiştir.

**Çizelge 3.2:** Karışımların basınç deney sonuçları

| Deney yöntemi          | 1.grp       | 2.grp        | 3.grup       | 4.grup              | 5.grup       | 6.grp                | 7.grup       | 8.grp                 |
|------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|----------------------|--------------|-----------------------|
| Ortam ve kür sıcaklığı | 500Ç        | 500Ç + C-S-H | 300Ç+ 200YFC | 300Ç+ 200YFC+ C-S-H | 300Ç+250 YFC | 300Ç+ 250YFC + C-S-H | 300Ç+ 300YFC | 300Ç + 300Y FC+ C-S-H |
| 9saat 8 °C             | Priz alımdı | 1.22 Mpa     | Priz almadı  | 0.84 Mpa            | Priz almadı  | 0,87 Mpa             | Priz almadı  | 0.83 Mpa              |
| 1günlük 8 °C           | 13,59       | 25,95        | 7,54         | 12,19               | 8,01         | 14,67                | 9,54         | 13,84                 |
| 20°C                   | -           | -            | -            | -                   | -            | -                    | -            | -                     |
| 3günlük 8 °C           | 39,50       | 54,10        | 24,40        | 30,20               | 25,87        | 31,22                | 27,65        | 30,10                 |
| 20°C                   | 58,95       | 58,01        | 38,39        | 38,65               | 47,72        | 47,56                | 48,9         | 48,58                 |
| 7günlük 8 °C           | 60,23       | 59,07        | 46,91        | 48,50               | 49,16        | 49,41                | 48,96        | 48,65                 |
| 20°C                   | 72,71       | 71,7         | 64,12        | 64,45               | 59,15        | 60,67                | 69,43        | 72,18                 |
| 28günlük 8 °C          | 74,20       | 75,66        | 68,20        | 72,20               | 74,58        | 80,30                | 77,65        | 83,54                 |
| 20°C                   | 87,12       | 86,5         | 75,2         | 74,3                | 101,2        | 100,8                | 102,3        | 101,2                 |
| 90günlük 8 °C          | 89,12       | 90,75        | 90,45        | 91,14               | 105,75       | 106,88               | 108,41       | 109,9                 |
| 20°C                   | 92,17       | 91.8         | 92.76        | 92.45               | 107.45       | 107.92               | 111.25       | 110.8                 |

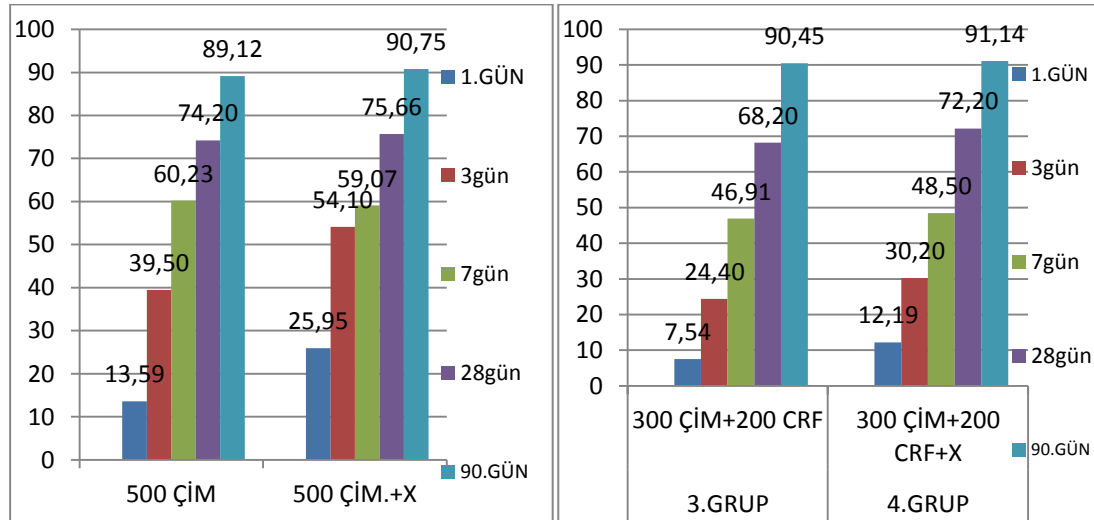
Üstteki çizelgeden anlaşılacağı üzere 8°C ortam sıcaklığında 9 saat kalıplarda kalan numunelerden sentetik C-S-H katılmamış numunelerin hiçbirisi test cihazında bir değer okunacak priz değerine ulaşamamıştır. Sentetik C-S-H katkılı olan 2,4,6,8 nolu gruptaki numuneler ise sırasıyla 1.22 , 0.84, 0.87 ve 0.83 Mpa değerine ulaşabilmişlerdir.

1.günlük numuneler karşılaştırıldığında ,sentetik C-S-H katkılı numuneler sadece çimentolu grupta % 100 ,YFC ikameli gruplarda ise yaklaşık %50 mertebelerinde daha fazla dayanıma ulaşmışlardır. 3 günlük numuneler karşılaştırıldığında ,8° C sıcaklıkta kürlen numuneler ile 20° C de kürlen numuneler kıyaslanırsa 8°C de ki kür koşullarında sentetik C-S-H katkılı numunelerin katkısız olanlara göre ,sadece çimentolu karışımlarda % 35 ye varan oranlarda fazla dayanıma sahip oldukları,YFC ikameli olanlarda ise %10 ile 20 arasında dayanım artışı olduğu görülmüştür.20° C

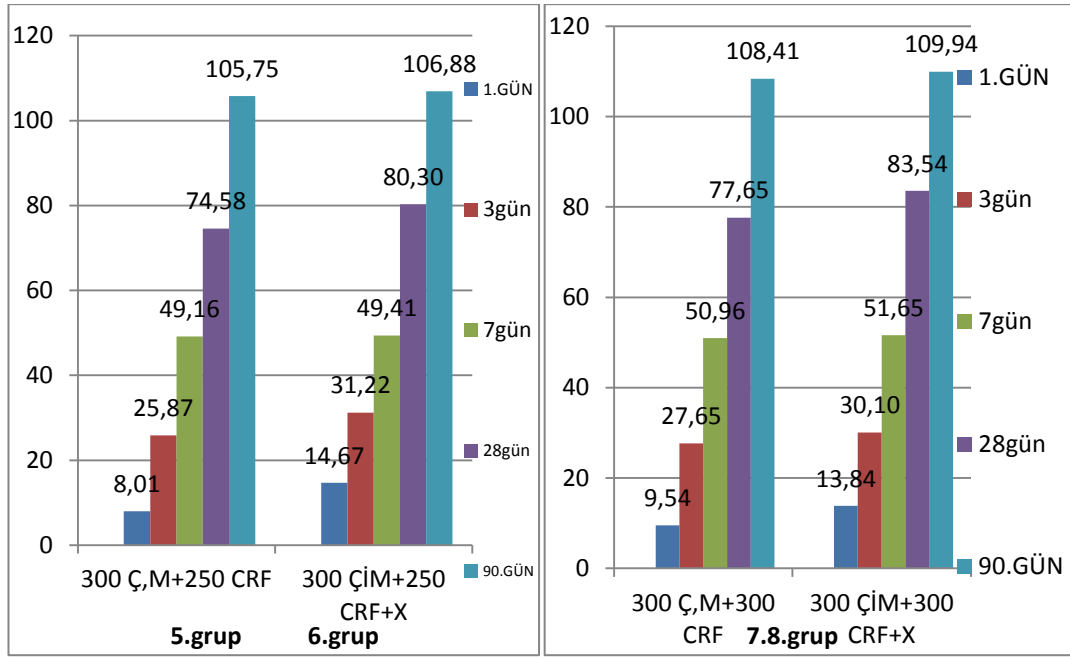
de kürlenene numuneleri kıyasladığımız da ise sentetik C-S-H katkılı veya katkısız numuneler kendi grupları içinde hemen hemen aynı basınç dayanımlarına ulaşmışlardır.Yani sentetik C-S-H ilavesinin olumlu katkısı önemsizdir.

7 günlük numunelerin deney sonuçları incelendiğinde , 8° C de kürlenene numunelerin tüm gruplarında sentetik C-S-H katkısının etkisinin kaybolduğu ve 20° c de kürlenene numunelere göre dayanımlarının %10 ila 20 mertebesinde daha düşük dayanımlarda olduğu görülmüştür.Bu durum 28 ve 90 günlük numunelerde de azalarak görülmüş ve 90 günlük numunelerde farklı sıcaklıklarda kürlenene numunelerin sıcaklık etkisinden bağımsız hale gelerek hemen hemen eşitlendiği anlaşılmıştır.

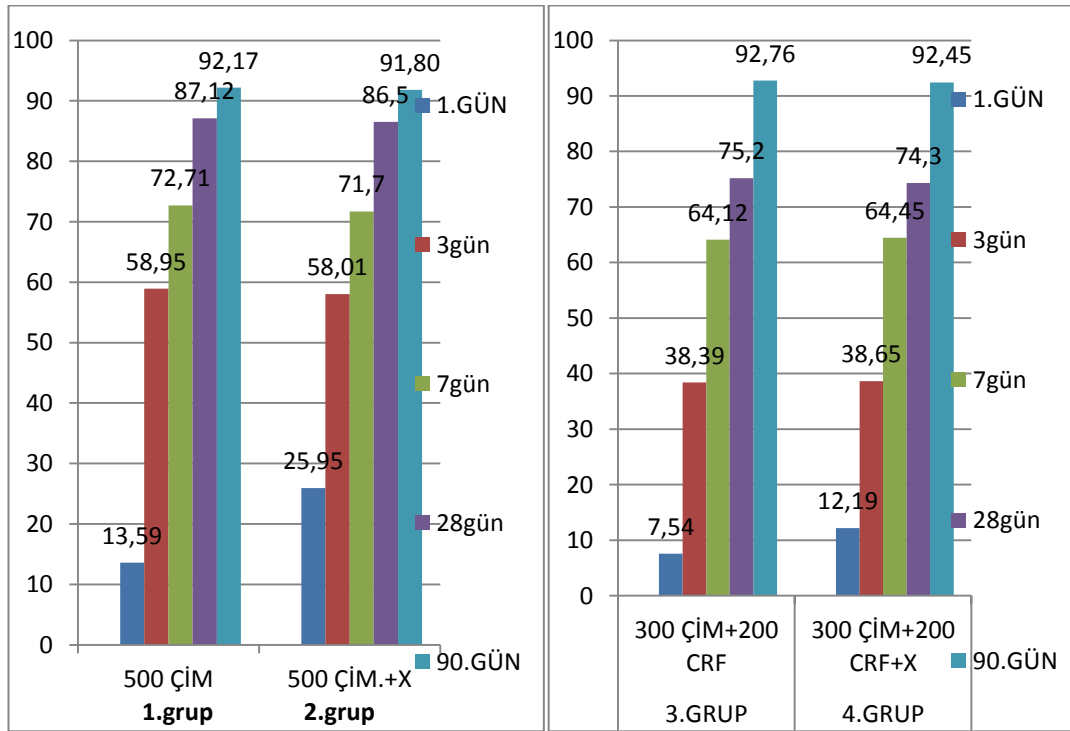
Ayrıca genel sonuçlara baktığımız da 90 günlük numuneler incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına en fazla YFC ikame edilen 7 ve 8. Gruplarda ulaşıldığı görülmektedir.Karışımların sentetik C-S-H katkısız ve katkılı karşılaştırmalı basınç dayanım grafikleri Şekil 3.6,3.7,3.8 de gösterilmiştir.



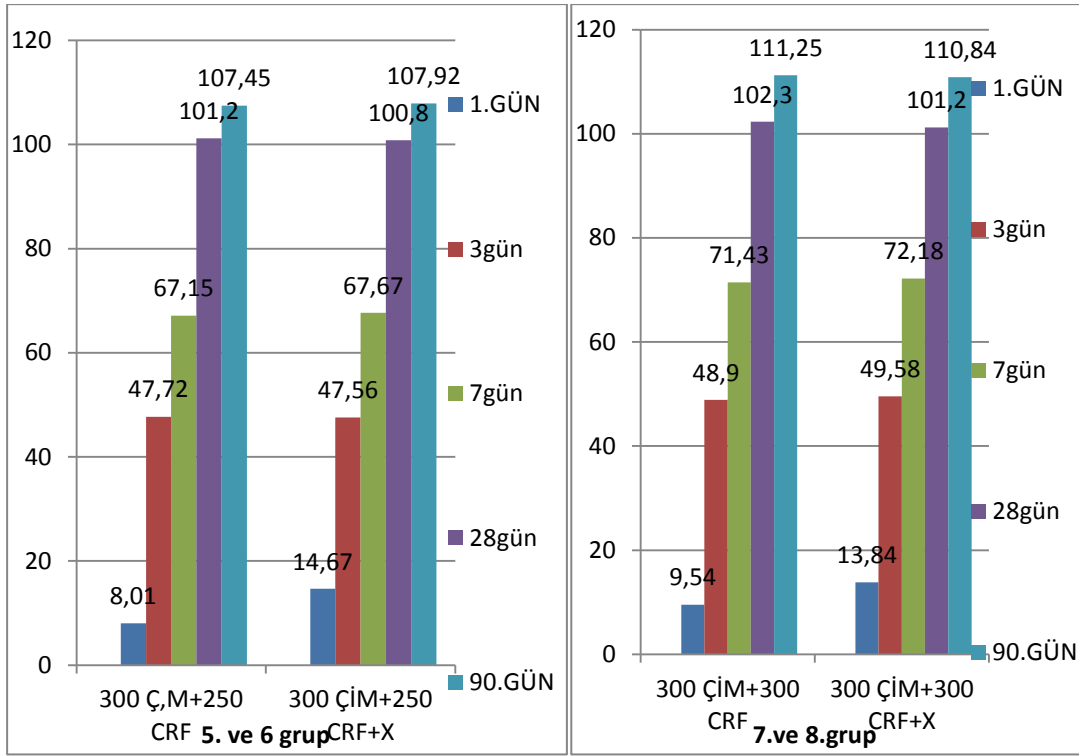
**Şekil 3.6 :**8°C su küründeki 1, 2, 3 ve 4. grup numunelerin basınç dayanım grafikleri



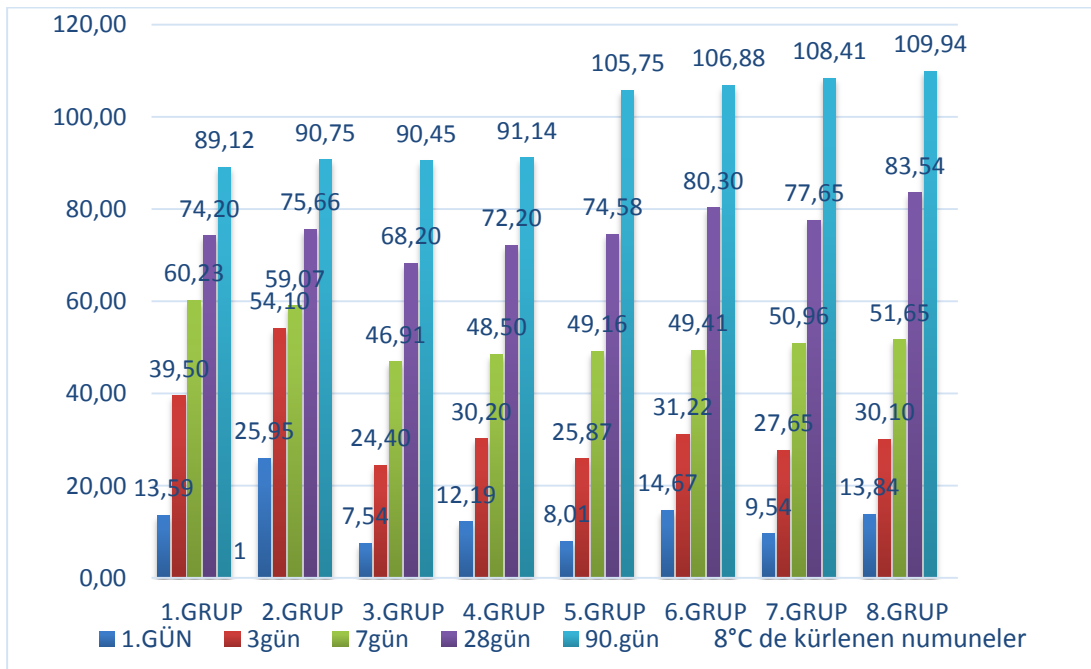
**Şekil 3.7 :8°C su küründeki 5,6,7 ve 8..grup numunelerin basınç dayanım grafikleri**



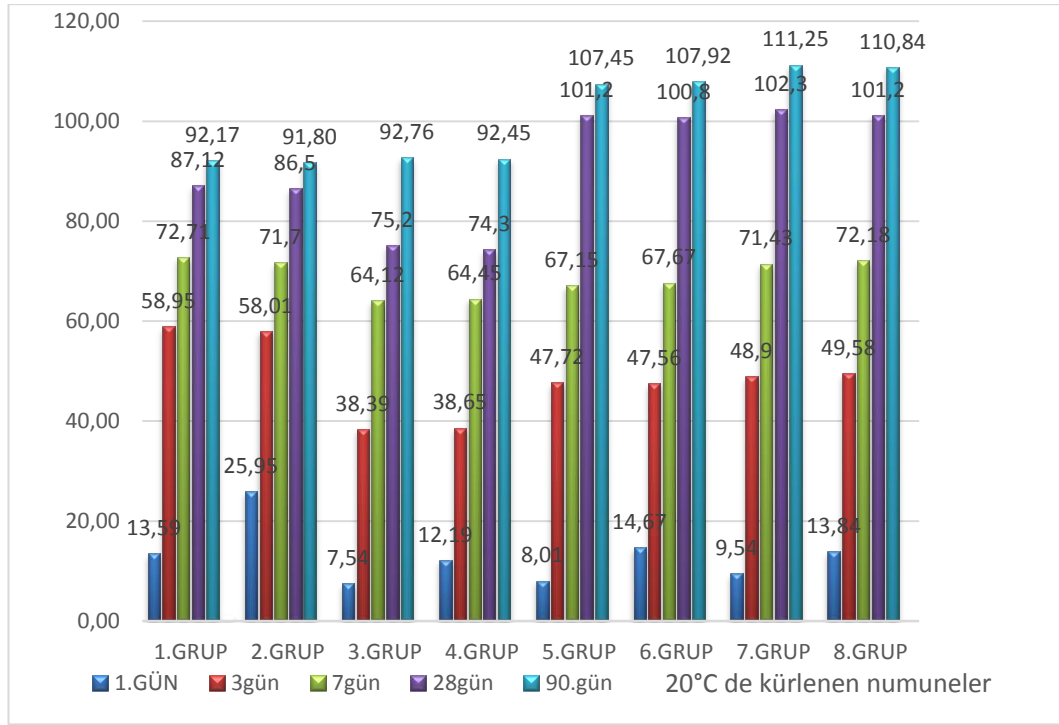
**Şekil 3.8 :20°C su küründeki 1,2,3 ve 4.grup numunelerinin basınç dayanım grafikleri**



**Şekil 3.9 :20°C su küründeki 5,6,7 ve 8.grup numunelerinin basınç dayanım grafikleri**



**Şekil 3.10 :8°C de suda kürlenen tüm grupların basınç dayanım grafiği**



**Şekil 3.11 :20°C de suda kürlenmiş tüm grupların basınç dayanım grafiği**

### 3.2.2 Kılcallık Deneyi Sonuçları

Betonun kılcal boşluk yapısı hakkında bilgi veren bu deneyde birim alandan emilen suyun zamanın kareköküne göre değişimine göre grafiği oluşturulmuş ve bu grafikteki doğrunun eğimini veren denklemde x in önündeki katsayı kılcallık katsayısı olarak kabul edilmiştir. Çizelge 3.3 te elde edilen kılcallık katsayıları verilmiştir.

**Çizelge 3.3: Kılcallık katsayıları ( $\times 10^{-5} \text{ gr/cm}^2 \text{ sn}^{0,5}$ )**

| 8°C de kürlenmiş | 7.gün | 28.gün | 90.gün |
|------------------|-------|--------|--------|
| 1.grup           | 100   | 85     | 70     |
| 2.grup           | 98    | 78     | 65     |
| 3.grup           | 88    | 50     | 36     |
| 4.grup           | 85    | 47     | 35     |
| 5.grup           | 65    | 40     | 33     |
| 6.grup           | 64    | 39     | 32     |
| 7.grup           | 59    | 37     | 28     |
| 8.grup           | 58    | 35     | 27     |

Yukarıdaki tablodan anlaşılağı üzere YFC ikamesi arttıça kılcallık katsayıları düşmüştür.Bu da daha az boşluklu ve daha aza su emen beton elde edildiğini göstermektedir.YFC ikamesinin betonun uzun vadede dayanıklılığını artıracığı tabiidir

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan tüm deneylerden elde edilen verilere dayanılarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

1- Taze betonların yayılma çapları  $70\pm3$  olan karışımların içeriğine bakıldığında, YFC ikameli karışımlarda daha az akışkanlaştırıcı kullanıldığı görülmektedir. Bu da YFC nin taze beton işlenebilirliğine olumlu katkı yaptığının göstergesidir. YFC nin inceliğinin çimentoya göre daha fazla olmasına rağmen daha az akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duymasının sebebi YFC nin yüzeyinin camsı pürüzsüzlükte ve su emmesinin daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca özgül ağırlığı çimentoya göre daha az olduğundan daha fazla hacim kaplar ve agregaların etrafını sarmak için gereken hamur hacmini arttırır.

2- V hunisi değerleri incelendiğinde yine YFC ikameli karışımların daha rahat akış gösterdiği ve ayrışma riskini azalttığı görülmüştür. Bunun sebebi de yine özgül yüzey alanının geniş olması sebebiyle su moleküllerini bünyesinde tutarak terlemeye izin vermemesi bu sayede agregaları çevreleyen hamurun kararlılığının bozulmamasıdır.

3- Diğer taze beton deneylerinde de en iyi sonuçları veren karışımlar ince malzeme miktarının arttığı karışımlar olmuştur. KYB özelliklerini temsil eden geçiş kabiliyeti, doldurma yeteneği ve ayrışma direnci faktörlerini YFC ikameli karışımlar daha iyi yerine getirmişlerdir.

4- Viskometre deneylerinin sonuçları incelendiğinde referans karışım olan 1. grup numunelerine göre YFC ikame oranı (ince malzeme) arttıkça viskozite katsayılarında artış olmasına rağmen kayma eşiklerinde önemli bir fark olmamıştır. En fazla YFC ikame oranına sahip olan 7. Ve 8. Grup numuneler de viskozite katsayısı artarken kayma eşiği de artmıştır. Ayrıca ince malzeme miktarı arttıkça kayma kalınlaşması etkisinin azalarak  $600\text{kg/m}^3$  bağlayıcı içeren karışımlarda kayma gerilmesi –kayma hızı arasındaki ilişkinin doğrusallaştığı görülmüştür.

5- Viskometre deneylerinden çıkardığımız bir diğer sonuç ise; ani ve 60.dakikada ölçülen viskozite katsayısı ve kayma eşik değerlerini kıyasladığımızda, her farklı karışım grubunda kendi içlerinde bu değerlerin çok değişmediği, yani KYB lerin kararlılığının bozulmadığıdır.Bu kararlılığın uzun süre korunmasını sağlayan faktörün akışkanlaştırıcının cinsi ve kullandığımız çimento ile uyumu olduğu söylenebilir.

6- Sentetik C-S-H ilave edilmiş karışımlar ile diğer karışımların taze beton deney sonuçları kıyaslandığında kıvamın (akıcılığın) bir miktar arttığı gözlenmiştir.Bunun sebebinin süspansiyon haldeki sentetik C-S-H bileşiklerinin içerdiği ilave su miktarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

7- Sentetik C-S-H katkılı karışımların 60.dakika sonundaki viskozite ve akma eşiği değerleri katkısız olanlara nazaran biraz yükselmiştir.

8- Sertleşmiş beton deneyleri sonucunda 9 saat sonunda sadece sentetik C-S-H katkılı numuneler basınç dayanımları test cihazında ölçülebilecek seviyeye çıkmıştır. Diğerleri test makinesinin veri almasına müsaade edecek prize ulaşamamıştır.

9- 8°C ortam sıcaklığında 1 günlük numunelerin dayanımları karşılaştırıldığında, sentetik C-S-H ilave edilmiş 2. grup karışımın basınç dayanımı ,sadece çimento içeren 1.grup karışıma göre yaklaşık % 100 e varan oranlarda artış göstermiştir.Diğer YFC ikameli karışımlarda ise C-S-H ilaveli olanlar yaklaşık % 50 daha fazla dayanım göstermişlerdir. Bu sonuçlar sentetik C-S-H ın çimento hidratasyon mekaniğine ne kadar olumlu katkı yapmış olduğunu ispat etmiştir.YFC nin çimentonun hidratasyon ürünü olan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerek yeni C-S-H ürünleri oluşturması sebebiyle, daha yavaş reaksiyona girmesine rağmen sentetik C-S-H katkılı YFC ikameli karışımların, sentetik C-S-H katkısı olmayan YFC ikameli karışımlara göre oldukça yüksek dayanım vermeleri YFC nin bu yavaş hidrate olma özelliğini oldukça azalttığı söylenebilir.

10- 20 °C sıcaklıta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde 1.günden sonra, sentetik C-S-H katkılı ve katkısız olan numunelerde önemli bir fark kalmadığı birbirine yakın değerlere ulaşıldığı görülmüştür.

## 5. KAYNAKLAR

- Aggoun, S., Kheirbek, A., E.H., K., & Duval, R.** (2002). Study of the Flow Self Compacting Concretes”, *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*.
- Akman, M.S.** (1987). *Beton Katkı Maddelerinin Ana İşlevleri ve Yan Etkileri*. İ.T.Ü. inşaat Fakültesi Malzeme Seminerleri.İstanbul
- Alizadeh, R., Beaudoin, J. J., Raki, L., Makar, J., & Moudrakovski, I.** (2011). C-S-H Seeding: An Approach for the Nanostructural Tailoring of Cement-Based Materials. *13th International Congress on the Chemistry of Cement*, (s. 11). Madrid, Spain.
- Alizadeh, R., Raki, L., Makar, J., Beaudoin, J., & Moudrakovski, I.** (2009). Hydration of tricalcium silicate in the presence of synthetic calcium silicate hydrate. *Journal of Materials Chemistry*(7937-7946), 19.
- Aruntaş, H. Y.** (2006). Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli J.Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. 21: 1, 193-203.
- ASTM C 1585-13.** (2013). *Standart Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes* . United States: American Society for Testing and Materials.
- Atahan, N.H.** (2002). Düşük Su/Çimento Oranlı Betonlarda Özelliklerin Çimento Hamurun Boşluk Yapısına Duyarlılığı”, Doktora Tezi, İ.T.Ü.
- Boel, V., Audenaert, K., & Schutter, G.** (2002). Pore Structure of Self-Compacting Concrete. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* .
- Bouzoubaa, N., & Lachemi, M.** (2001). “Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash Preliminary Results. *Cement and Concrete Research*, (s. 31, No. 3, 413–420).
- Bui, V., Montgomery, D., Hinczak, I., & Turner, K.** (2002). Rapid Testing Merhod for Segregation Resistance of Self Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research*, 32,9 ,1489-1496.
- Collepardi, M.** (2001). A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC). u. data. içinde
- Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R., & Torresan, I.** (2002). zero energy system. İstanbul.
- Çekirdeklenme.** (2014, 11 25). *e-eğitim/malzeme/çekirdeklenme*. teknolojikarastirmalar.com adresinden alınmıştır
- D.S.İ.** (1993). Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Sulama Kanallarında Sülfat Problemleri ve Çözüm Önerileri, Ankara.
- EFNARC.** (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Federation of Specialist Consturiction Chemicals and Concrete Systems*. United Kingdom.

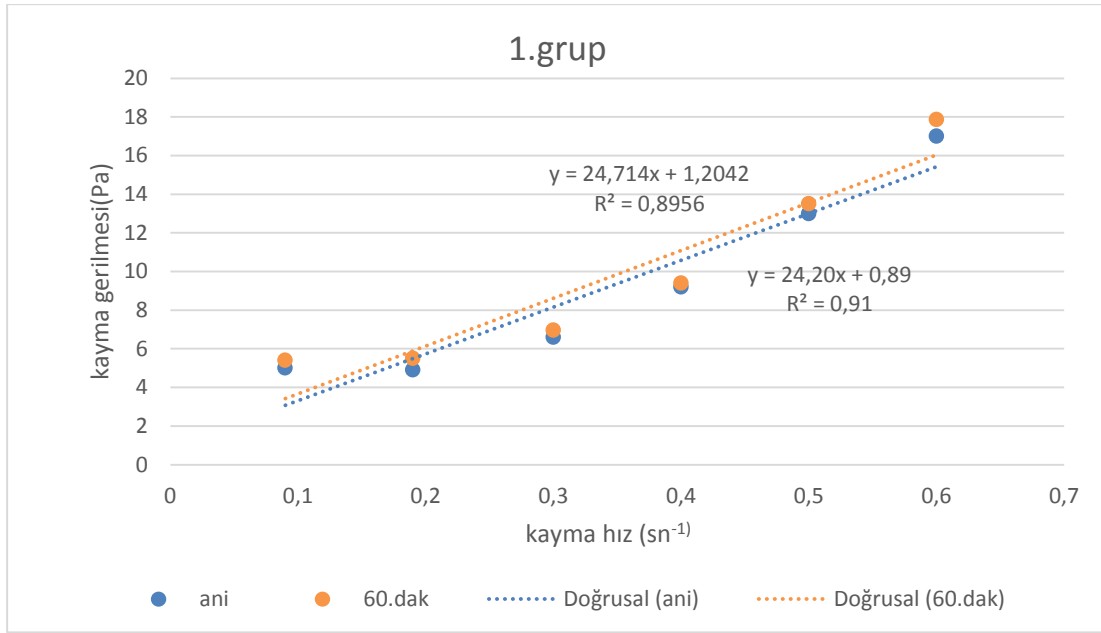
- EFNARC.** (2005, May). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. Specification, Production and Use.*
- Engineers, J. S.** (1999, August). Recommendation for Self-Compacting Concrete . Tokyo,, Japan.
- Erdogan, T.** (2003). *Beton.* Ankara.: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Erdoğan, T.** (1995). Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu ve Kullanımı. *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu*, (s. 1-13). Ankara.
- Fang, W., Jianxiong, C., & Changhui, Y.** (1999). Studies on self-compacting high performance.
- Felekoğlu, B.** (2003). “Kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması”. *Yüksek Lisans Tez.* İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Ferraris, C.** (1999). Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete: . *State of the Art Report*”, *Journal of the National Institute of Standards and Technology*, Vol.104, No.2, pp. 461-478.
- Fugiwara, H., & Nagataki, S.** (1999). Study of self-compactibility of high-fluid concrete.
- Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L. N., & Nielsen, L. F.** (2002). On the Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete. *Cem. Concr. Aggr.*, 24(1), *ASTM Int.*, 3-6.
- Gündeşli, U.** (2008). Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Adana: Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği A.B.D.
- Gürdal, H., & Yüceer, Z.** (2004). Türkiye’de ve Dünya’da Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları. *2004 Bildiriler Kitabı* (s. 244-254). İstanbul: Hazır Beton Kongresi,.
- Ho, D., Sheinn, A., Ng, C., & Tam, C.** (2002). The use of quarry dust for SCC applications.
- Hughes, J.** (2002). Evaluation of Self-Consolidating Concrete – Summary report. ABD.
- Khayat, K.** (1999). *Workability, testing, and performance of self-consolidating concrete.* . ACI Mater J.
- Khurana, R., & Topçu, O.** (2000). Role of Superplasticizers in the development of self compacting concrete. *Second International Symposium on Cement and Conc. Tech. in the 2000s, Volume I.*, Istanbul.
- Koehler, E. P., & Fowler, D. W.** (2003). *Summary of Concrete Workability Test Methods.* Texas: The University of Texas, International Center for Aggregates Research (ICAR), Report Number: ICAR 105-1, p. 92.
- Land, G., & Stephan, D.** (2012). The Influence of Nano-silica on the Hydration of Ordinary Portland Cement. *Journal Material of Science*, No.47(2),. pp.1011–1017.
- Mantel, D.** ( 1994). Investigation into the Hydraulic Activity of Five Granulated Blast Furnace Slags with Eight Different Portland Cements . *ACI Material Journal*, , 91.
- Mehta, P. v.** (2013). *Concrete:Microsturucture,Properties,and Materials.* Mc Graw Hill Education.

- Mehta, P., & . Monteiro, P.** (1997). Concrete Microstructure. *Properties and Materials, Chapter 8: Admixtures* (s. 256-271). Chennai: Indian Concrete Institute.
- Nicoleau, L.** (2011). Accelerated Growth of Calcium Silicate Hydrates: Experiments and simulations. *Cement and Concrete Research*, 1339–1348.
- Nielsson, I., & Wallevik, O. H.** (2003, August). Rheological evaluation of some empirical test methods-Preliminary results. -, *3rd Int. Symp. on Self-Compacting Concrete*, Ed. by O. Wallevik and I. Nielsson, pp. 59-68, ,, Reykjavic, Iceland,.
- Okamura, H., & Ouchi, M.** (1999). Self Compacting Concrete Development, Present and Future. *proceeding of 1st International Rilem Symposium on Self Compacting Concrete*. Sweden.
- Okamura, H., & Ouchi, M.** (2003). Self Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology* (s. Vol. 1, No. 1). içinde Japan Concrete Institute.
- Okamura, H., & Ozawa, K.** (1995). *Mix-design for self-compacting concrete*. Tokyo: Concrete Library of JSCE.
- Okay, Ö., & Akkaya, Y.** (2011). Yüksek Dayanım ve Yüksek Performanslı Betonlarda Yüksek Fırın Cürufu Kullanımı,. *Hazır Beton Kongresi Bildirileri* (s. 388-394). İstanbul: THBB.
- Ouchi, M.** (1999). “Self-compacting concrete – Development, applications and investigations”. Nordic Concrete Research Committee Publications.
- Özbora, A., Tarhan, M., & Engin, Y.** (2013). Nano teknolojinin betonun geleceğindeki rolü. *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri*. İstanbul.
- Özkul, M. H.** (2002). “ Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton”. *THBB Hazır Beton Dergisi*, (52), 64-71,.
- Özkul, M. H., Doğan, Ü. A., Işık, E., Sağlam, A. R., & Parlak, N.** (2006). Kendiliğinden Yerleşen Beton: Temel İlkeler ve Özellikler. *T.H.B.B. Dergisi*, 54-61 .
- Özturan, T., & Çeçen, C.** (1997). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strength. *Cem. Concr. Res.* 27 (2), 165–170,.
- Perez, N., Hermida, G., & Romero, H. C.** (2002). Self-Compacting Concrete, on the Search and Finding of an Optimized Design. *Concrete, on the Search and Finding of an Optimize, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* .
- Persson, B.** (2001). A comparison between mechanical properties of selfcompacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 31.
- Postacioğlu, B.** (1986). *Beton Cilt 1*. İstanbul .
- Rixom, M., & Mailvanagam, N.** (1986). Chemical Admixtures for Concrete. London: E and FN Spon.
- Sancak, E., & Şimşek, O.** (2008). Influence of silica fume addition to pumice concrete on corrosion behaviour of reinforcement bars. *7th International Congress Concrete: Construction's Sustainable Option, Concrete Durability: Achievement and Enhancement Section*, pp.237-248, Dundee, Scotland, .

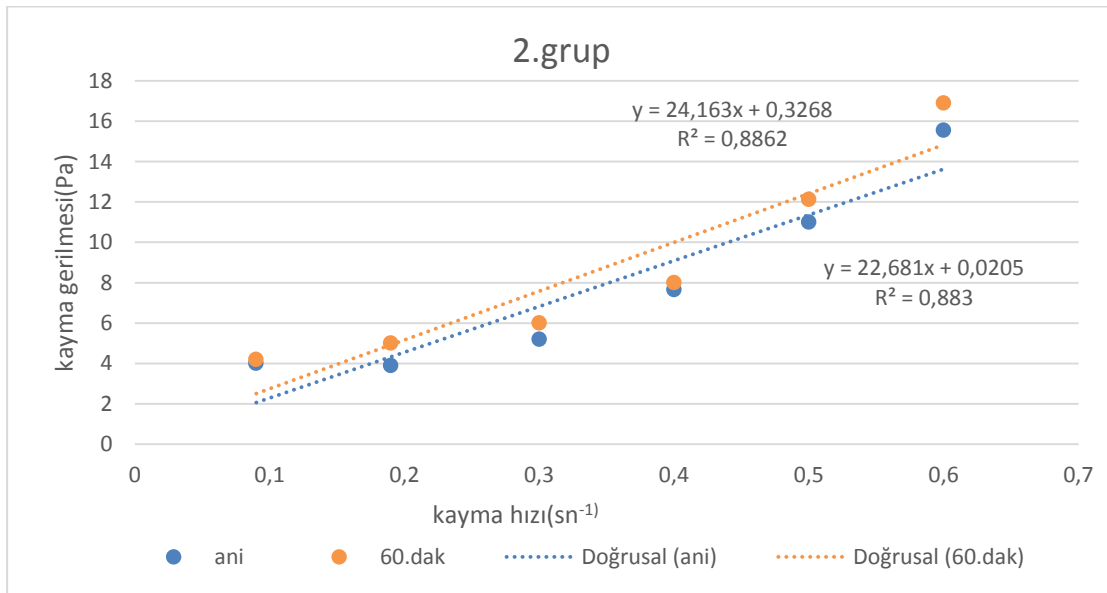
- Sari, M., Prat, E., & Labastire, J.** (1999). High strength self-compacting concrete Original solutions associating organic and inorganic admixtures . *Cem. Concr. Res.*, Vol: 29.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Koç, İ., Tarhan, M., & Erenoğlu, T.** (2007). Doğal ve Endüstriyel Mineral Katkılar İçeren Betonların Tasarımı, Mekanik Özellikleri ve Durabilitesi. 7. Ulusal Beton Kongresi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul, s 291-300
- Skarendahl, A., & Petersson, O.** (2000). *Self Compacting Concrete*. State-of-the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC.
- Skarp, U., Engstrand, J., & Jansson, I.** (2002). A Concept for Enhancing Early Strength Development in Self-Consolidating and Normal Concrete by Means of Increased Stability and Homogeneity. *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete* .
- Su, N., Hsu, K., & Chai, H.** (2001). A simple mix design of self-compacting.
- Subaşı, S.** (2009). Portland Kompoze Çimentolu Betonlarda Uçucu Kül İkamesinin Donma-Çözülme Dayanıklılığına Olan Etkisi. *e-Journal of New World Sciences Academy Technological Applied Sciences*, 67-76.
- Terzi, S.** (2000). Mermer Toz Atıkların Asfalt Betonunda Filler Malzemesi Olarak Kullanımının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta .
- TS EN 12390-3.** (2003). *Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3:Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- Türkmen, İ., Gavgalı, M., & Gül, R.** (2003). “Influence of mineral admixtures on the mechanical properties and corrosion of steel embedded in high strength concrete. (s. 57: 2037-2043). ” *Materials Letters*, .
- Tviksta, L.** (2000). *Brite Euram Project: Rational Production and Improved Working Environment Through Using Self Compacting Concrete*. FINAL REPORT: TASK 8.4 Quality control”, NCC AB .
- Uygunoglu, T.** (2009). Yüksek Oranda Silis Dumanı içeren Harçlarda Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) Gelişiminin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 5(2) 9-1.
- Ünal, O., & Kibici, Y.** “. (2001). Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması., (s. 317-325). Afyon.
- Wallevik, O.** “. ( 2003). Rheology - A Scientific Approach to Develop Self-Compacting Concrete’, *3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Reykjavik, Iceland, .: Rilem.,
- Walraven, J.** (2002). Self-Compacting Concrete in the Netherlands . *First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*.
- Yahia, A., Tanimura, M., & Shimabukuro, A. Y.** (1999). Effect of rheological parameters on self compactability of concrete containing various mineral admixture. *Proceedings of the First International RILEM Symposium*. Edited by A.Skarendahl and Ö.Petersson.
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M.** (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cem. Concr. Res.*, Vol: 30.
- Yıldız, S., Yalınbaş, M., & Keleştemur, O.** (2006). “Silis Dumanı Katkılı Yapı Alçılarında Basınç Dayanımının Araştırılması” Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 11, Sayı 2.

## **EKLER**

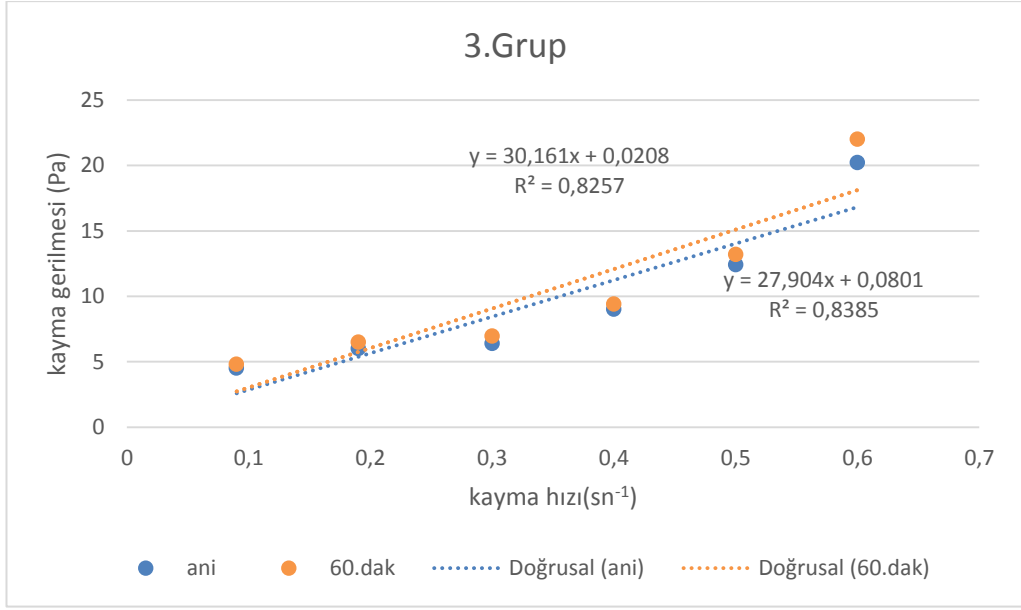
**EK A:** Karışımların viskozite katsayılarının elde edildiği grafikler



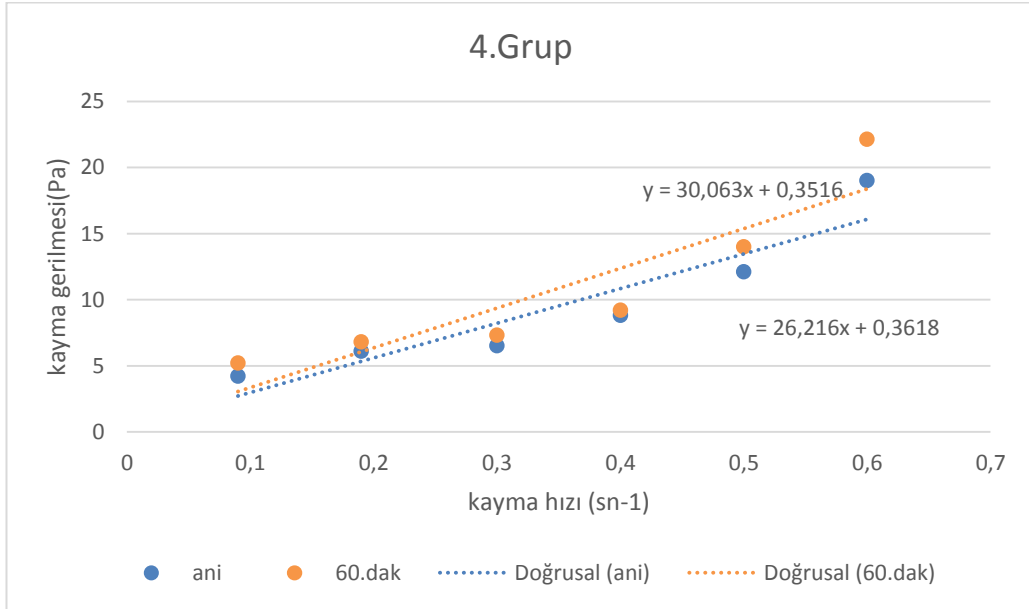
**Şekil A.1:** 1.grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



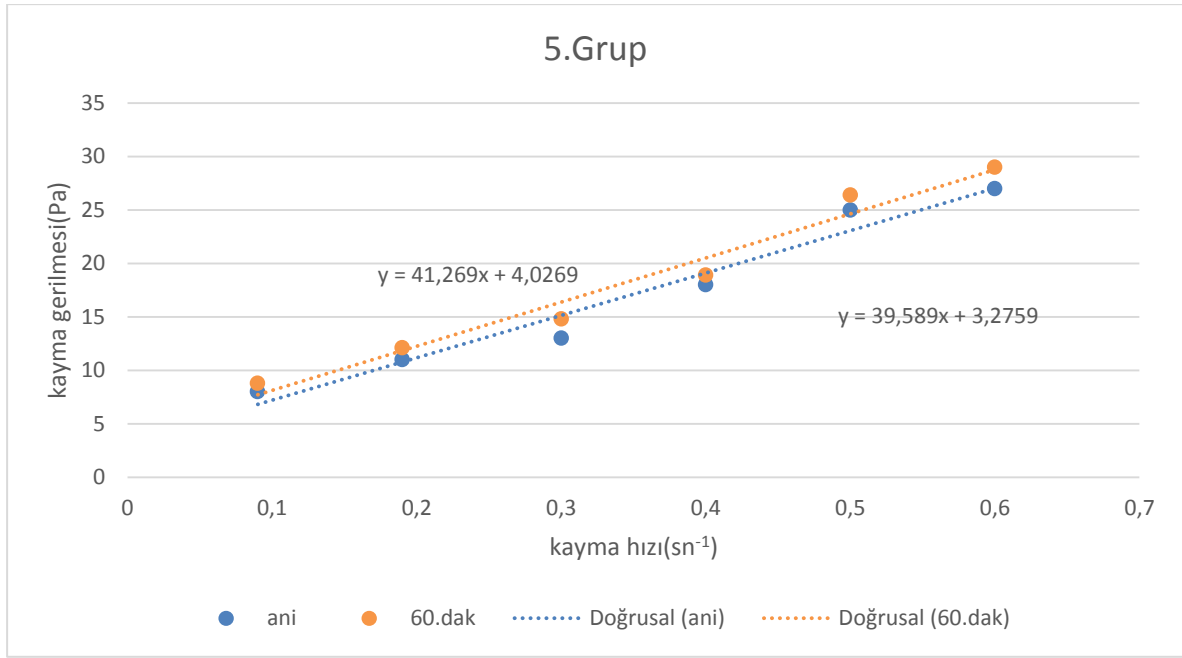
**Şekil A.2:** 2. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



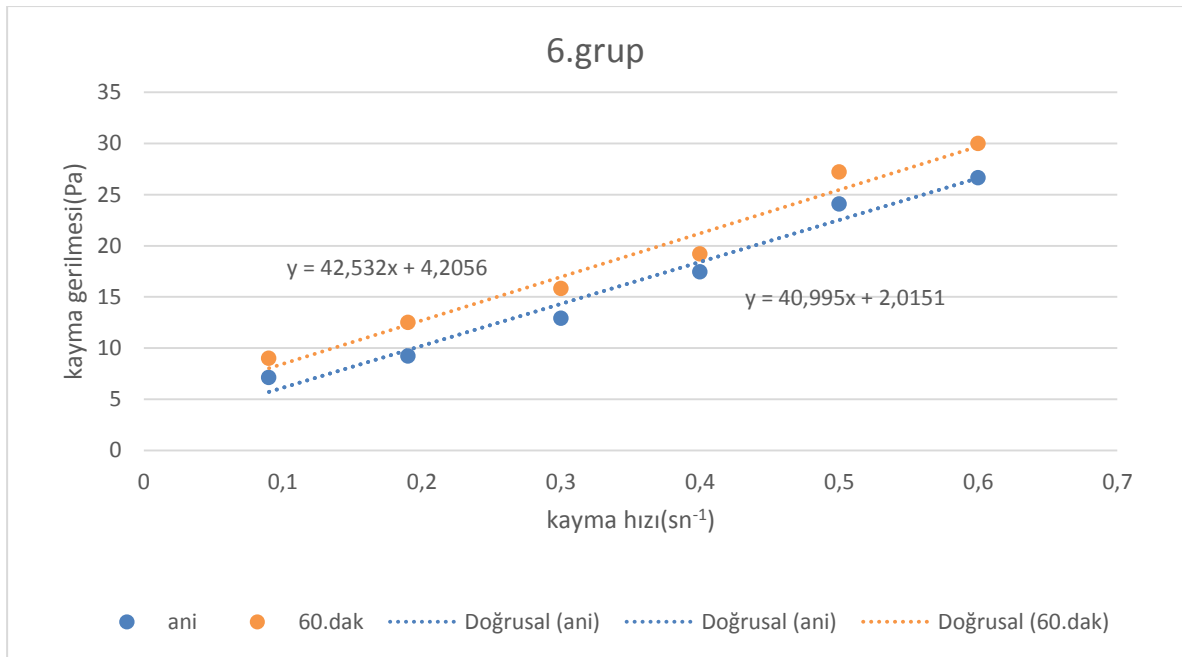
**Şekil A.3:** 3. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



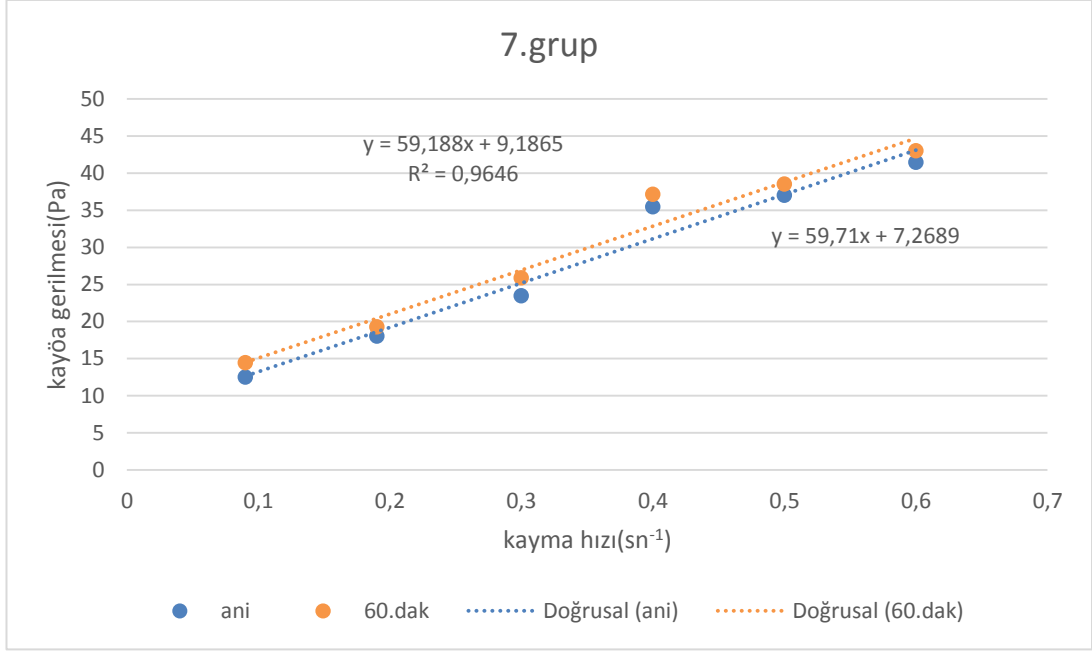
**Şekil A.4:** 4. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



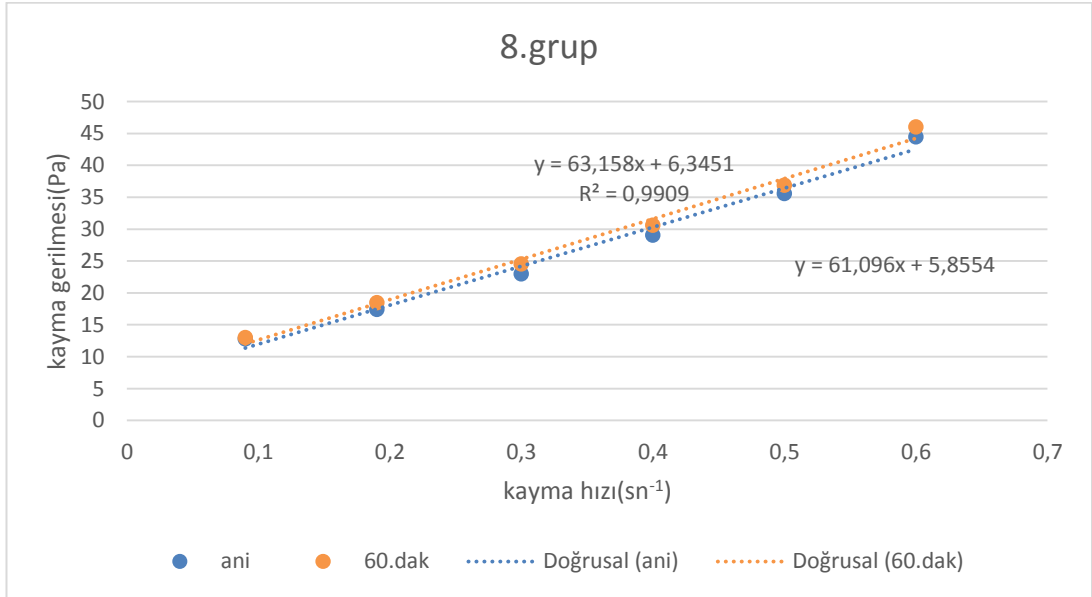
**Şekil A.5:** 5. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



**Şekil A.6:** 6. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



**Şekil A.7:** 7. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



**Şekil A.8:** 8. grup karışımın viskozite katsayısının elde edildiği grafik



## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** :Mustafa Oğuz SAF

**Doğum Yeri ve Tarihi** : İstanbul 1969

**E-Posta** :oguzsaf@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :1992, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü