



**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN  
DAYANIM ve HIZLI KLOR İYON  
GEÇİRİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Ayhan Soner AĞSU**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Malzemesi Bilim Dalı**

**Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL**

**2019**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN DAYANIM ve  
HIZLI KLOR İYON GEÇİRİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Ayhan Soner AĞSU**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Yapı Malzemesi Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2019**

**Her Hakkı Saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN DAYANIM ve HIZLI KLOR İYON  
GEÇİRİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'ün danışmanlığında, Ayhan Soner AĞSU tarafından hazırlanan bu çalışma 11/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı Malzemesi Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

İmza :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 23.08.2019 tarih ve 33 / 57 ..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN Y.  
Enstitü Müdürü

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

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### **KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN DAYANIM ve HIZLI KLOR İYON GEÇİRİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Ayhan Soner AĞSU

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yapı Malzemesi Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) işlenebilirlik, işçilik maliyetinde ki azalma ve yüksek dayanım gibi özellikleri bakımından geleneksel betona kıyasla yüksek performansa sahip bir beton türüdür. KYB üretiminde toz malzeme ve/veya viskozite düzenleyici katkı ile su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri yüksek oranda kullanılmaktadır. KYB üretiminde silis dumanı (SD), uçucu kül (UK), kireçtaşı tozu ve granüle yüksek fırın cürufu toz malzeme olarak kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada KYB üretilmiş ve mineral katkı maddesi olarak SD ve UK kullanılmıştır. Üretilen KYB'nin S/Ç oranı sabit tutularak mineral katkı maddeleri çimento yerine ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında SD ve %15, %30 ve %45 oranlarında UK kullanılmıştır. Üretilen farklı içerikli KYB'nin taze beton özellikleri belirlenmiştir. Sertleşmiş betonlarda 28 ve 180 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve hızlı klor iyon geçirimliliği deneyleri yapılmıştır.

Mineral katkıların KYB'nin işlenebilirlik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Mineral katkıları belirli oranlara kadar basınç ve eğilme dayanımlarında artış sağlamış, belli oranlardan sonra azalmalara neden olmuştur. En yüksek basınç ve eğilme dayanımı %15 SD kullanılarak üretilen ve 180 gün kürde bekletilen betonlardan elde edilmiştir. Hızlı klor iyon geçirimliliği bakımından mineral katkılı betonların geçirimliliği katkısız betonlara göre önemli derecede azalmıştır. En az geçirimliliğe %45 UK kullanılarak üretilen betonların sahip olduğu görülmüştür.

**2019, 124 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinden yerleşen beton, silis dumanı, uçucu kül, klor iyon geçirimliliği, taze beton deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **RESISTANCE OF SELF-SETTING CONCRETE and INVESTIGATION OF FAST CHLORINE ION PERMEABILITY**

Ayhan Soner AĞSU

Atatürk University  
Grade School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering  
Building Materials Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Self-Compacting Concrete (SCC) is a high performance concrete type compared to conventional concrete in terms of its workability, reduction in labor cost and high strength. Powder material and/or viscosity regulating additive and water reducing superplasticiser additives are used in SCC production at a high rate. Silica fume (SF), fly ash (FA), limestone powder and granulated blast furnace slag are used as powder material in SCC production.

In this study, SCC was produced and SF and FA were used as mineral additives. While the I/O ratio of the SCC produced was kept constant, 5%, 10% and 15% by weight SF and 15%, 30% and 45% FA were used instead of mineral additives cement. The fresh concrete properties of SCC with different content were determined. 28- and 180-day compressive strength, flexural strength and rapid chlorine ion permeability tests were performed in hardened concrete.

It was obtained from the experiments that mineral additives had a positive effect on the machinability properties of SCC. Mineral admixtures increased pressure and bending strengths up to certain ratios and caused decreases after certain ratios. The highest compressive and bending strength was obtained from the concrete produced using 15% SF and cured for 180 days. In terms of rapid chlorine ion permeability, the permeability of mineral-doped concretes was significantly reduced compared to concrete without admixture. It was observed that the concrete having the lowest permeability was produced using 45% FA.

**2019, 124 pages**

**Keywords:** Self-compacting concrete, silica fume, fly ash, chlorine permeability, fresh concrete tests, hardened concrete tests

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve tez süresi boyunca her türlü yardım ve fedakârlığı esirgemeyen, güler yüzlü, bilgisi, tecrübesi ve önerileriyle yoluma ışık tutan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL'e teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu çalışmanın deneyleri aşamasında her türlü yardımı yapan kıymetli arkadaşlarım Sayın Cüneyt ÖZER, Sayın Erdal KISA, Sayın Abdülhamit DİNDİ ve Sayın Coşkun KAPLAN'a teşekkürü borç bilirim.

Bugününe kadar beni hiç yalnız bırakmayan, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen, bugünlere gelmemde emeği olan canım aileme ve rahmetli olan canım abim Ünal AĞSU'ya ithaf ederim.

**Ayhan Soner AĞSU**

**Haziran, 2019**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖZET.....                                                                                   | i         |
| ABSTRACT.....                                                                               | ii        |
| TEŞEKKÜR.....                                                                               | iii       |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                                                        | vii       |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                                        | x         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                                     | xii       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                                        | <b>1</b>  |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ .....</b>                                                             | <b>5</b>  |
| 2.1. Geleneksel Beton.....                                                                  | 5         |
| 2.1.1. Geleneksel betonun sınıfları .....                                                   | 6         |
| 2.1.2. Geleneksel betonun tasarımı .....                                                    | 8         |
| 2.1.3. Taze betonun özellikleri .....                                                       | 9         |
| 2.1.4. Geleneksel betonda basınç dayanımı .....                                             | 12        |
| 2.1.5. Geleneksel betonda durabilite .....                                                  | 13        |
| 2.1.6. Geleneksel betonda geçirimsizlik özellikleri.....                                    | 15        |
| 2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) .....                                               | 16        |
| 2.2.1. KYB'nin özellikleri.....                                                             | 18        |
| 2.2.2. KYB sınıfları .....                                                                  | 20        |
| 2.2.3. KYB'nin taze beton özellikleri.....                                                  | 25        |
| 2.2.4. KYB tasarım yöntemleri .....                                                         | 27        |
| 2.2.5. KYB'de taze ve sertleşmiş beton deneyleri .....                                      | 32        |
| 2.2.6. KYB'nin sertleşmiş beton özellikleri .....                                           | 34        |
| 2.2.7. KYB'de dayanım ve dayanıklılık (Durabilite) .....                                    | 35        |
| 2.2.8. KYB'de geçirimsizlik.....                                                            | 36        |
| 2.3. Klor İyon Geçirimsizliği.....                                                          | 39        |
| 2.4. Geleneksel Beton ve Kendiliğinden Yerleşen Beton İle İlgili Yapılan<br>Çalışmalar..... | 46        |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>                                                           | <b>59</b> |
| 3.1. Materyal.....                                                                          | 60        |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler .....             | 60        |
| 3.1.1.a. Çimento .....                                    | 60        |
| 3.1.1.b. Agregası .....                                   | 62        |
| 3.1.1.c. Karışım suyu .....                               | 62        |
| 3.1.1.d. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı .....            | 62        |
| 3.1.1.e. Uçucu kül .....                                  | 63        |
| 3.1.1.f. Silis dumanı .....                               | 64        |
| 3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler .....                | 66        |
| 3.1.2.a. Betonyer .....                                   | 66        |
| 3.1.2.b. Çökme-yayılma deney aleti .....                  | 66        |
| 3.1.2.c. V hunisi deney aleti .....                       | 67        |
| 3.1.2.d. L kutusu deney aleti .....                       | 68        |
| 3.1.2.e. U kutusu deney aleti .....                       | 68        |
| 3.1.2.f. Numune Kalıpları .....                           | 69        |
| 3.1.2.g. Plastik su kürü havuzu .....                     | 69        |
| 3.1.2.h. Beton test presi .....                           | 70        |
| 3.1.2.ı. Hızlı klor iyon geçirimsizliği test cihazı ..... | 71        |
| 3.1.2.i. Terazı .....                                     | 71        |
| 3.1.2.j. Vakum ve desikatör .....                         | 72        |
| 3.2. Yöntem .....                                         | 72        |
| 3.2.1. Geleneksel beton ve KYB karışım hesapları .....    | 72        |
| 3.2.2. Geleneksel beton ve KYB taze beton deneyleri ..... | 74        |
| 3.2.2.a. Taze birim hacim ağırlığı tayini .....           | 76        |
| 3.2.2.b. Slump (Abrams Konisi) deneyi .....               | 76        |
| 3.2.2.c. Çökme - Yayılma deneyi .....                     | 77        |
| 3.2.2.d. V hunisi deneyi .....                            | 78        |
| 3.2.2.e. L kutusu deneyi .....                            | 79        |
| 3.2.2.f. U kutusu deneyi .....                            | 80        |
| 3.2.3. Su kürü seçeneklerinin belirlenmesi .....          | 81        |
| 3.2.4. Basınç dayanımı tayini yöntemi .....               | 82        |
| 3.2.5. Hızlı klor iyon geçirimsizliği tayini .....        | 83        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>           | <b>86</b> |

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1. Taze Beton Deneyleri .....                             | 86         |
| 4.1.1. Taze beton birim hacim ağırlık deney sonuçları ..... | 86         |
| 4.1.2. Geleneksel betonlar için slump deney sonuçları ..... | 88         |
| 4.1.3. Çökme-yayılma deney sonuçları .....                  | 89         |
| 4.1.4. V-Hunisi deney sonuçları .....                       | 93         |
| 4.1.5. L- Kutusu deneyi .....                               | 95         |
| 4.1.6. U- Kutusu deneyi.....                                | 98         |
| 4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri .....                       | 99         |
| 4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları .....                | 100        |
| 4.2.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları .....                | 104        |
| 4.2.3. Hızlı klor iyon geçirimsliliği deney sonuçları ..... | 107        |
| <b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>                            | <b>112</b> |
| KAYNAKLAR .....                                             | 116        |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                              | 125        |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

|                                |                                                     |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------|
| °C                             | Santigrat derece                                    |
| µm                             | Mikrometre                                          |
| C <sub>3</sub> A               | Kalsiyum Aluminat                                   |
| Ca(OH) <sub>2</sub>            | Kalsiyum Hidroksit                                  |
| CaCl <sub>2</sub>              | Kalsiyum Klorür                                     |
| CaSO <sub>4</sub>              | Kalsiyum Sülfat                                     |
| Cl                             | Klor                                                |
| cm                             | Santimetre                                          |
| cm <sup>2</sup>                | Santimetrekare                                      |
| CO <sub>2</sub>                | Karbondioksit                                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Demir Oksit                                         |
| gr                             | Gram                                                |
| H <sub>1</sub>                 | L kutusu kapağının arkasındaki beton derinliği (cm) |
| H <sub>2</sub>                 | L kutusunun uç kısmındaki beton yüksekliği (cm)     |
| K <sup>+</sup>                 | Potasyum                                            |
| kg                             | Kilogram                                            |
| kg-f                           | Kilogram - Kuvvet                                   |
| m <sup>3</sup>                 | Metreküp                                            |
| MgCl <sub>2</sub>              | Magnezyum Klorür                                    |
| mm                             | Milimetre                                           |
| MPa                            | Megapaskal                                          |
| N                              | Newton                                              |
| N.m                            | Newton.Metre                                        |
| Na <sup>+</sup>                | Sodyum                                              |
| NaCl                           | Sodyum Klorür                                       |
| NaOH                           | Sodyum Hidroksit                                    |
| OH <sup>-</sup>                | Hidroksit                                           |
| P                              | Kırılma Yüğü                                        |
| PA                             | Geçebilme Yeteneğı                                  |

|                               |                                      |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| pH                            | Power of Hydrogen (Hidrojen Kuvveti) |
| s                             | Saniye                               |
| SF                            | Akıcılık                             |
| SiO <sub>2</sub>              | Silisyum Dioksit                     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | Sülfat                               |
| SR                            | Ayrışma Direnci                      |
| VF                            | Viskozite                            |
| VS                            | Viskozite                            |

### Kısaltmalar

|        |                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------------------------|
| ACI    | American Concrete Institute                                            |
| ASR    | Alkali Silika Reaksiyonu                                               |
| ASTM   | American Society for Testing and Materials                             |
| BSE    | Cıvalı Porozimetre                                                     |
| CEM    | Çimento                                                                |
| CH     | Kalsiyum Hidroksit - Ca(OH) <sub>2</sub>                               |
| CSH    | Kalsiyum Silikat Hidrat (3CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O)    |
| EFNARC | European Federation of National Associations Representing for Concrete |
| ERMCO  | European Ready Mixed Concrete Organization                             |
| GB     | Geleneksel Beton                                                       |
| KYB    | Kendiliğinden Yerleşen Beton                                           |
| MIP    | Cıvalı Porozimetre                                                     |
| PÇ     | Portland Çimento                                                       |
| SD     | Silis Dumanı                                                           |
| SDÇ    | Silis Dumanlı Çimento                                                  |
| TÇ     | Traslı Çimento                                                         |
| TSe    | Türk Standartları Enstitüsü                                            |
| UK     | Uçucu Kül                                                              |
| VAK    | Viskozite Artırıcı Katkı                                               |

|      |                                  |
|------|----------------------------------|
| YDB  | Yüksek Dayanımlı Beton           |
| YFC  | Yüksek Fırın Cürufu              |
| YNSA | Yeni Nesil Süperakışkanlaştırıcı |
| SCC  | Self-Compacting Concrete         |
| FA   | Fly Ash                          |
| SF   | Silica Fume                      |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1. İşlenebilmeyi oluşturan elemanlar .....                                                                | 10 |
| Şekil 2.2. Normal beton ile KYB'nin karşılaştırılması.....                                                        | 18 |
| Şekil 2.3. Çeşitli uygulama alanları için KYB kıvam özellikleri .....                                             | 24 |
| Şekil 2.4. Beton içerisine sonradan giren klorür iyonlarının yüzeyden derine<br>doğru miktar değişim durumu ..... | 40 |
| Şekil 2.5. Betonun klorür geçirimliliğine S/Ç oranının etkisi .....                                               | 43 |
| Şekil 2.6. Betonun klorür geçirimliliğine S/Ç oranının ve pas payı tabakasının<br>kalınlığının etkisi .....       | 43 |
| Şekil 2.7. Cüruf- klor yayılımı içeriği.....                                                                      | 45 |
| Şekil 3.1. Betonyer.....                                                                                          | 66 |
| Şekil 3.2. Çökme-yayılma deney aleti .....                                                                        | 67 |
| Şekil 3.3. V hunisi deney aleti .....                                                                             | 67 |
| Şekil 3.4. L kutusu deney aleti.....                                                                              | 68 |
| Şekil 3.5. U kutusu deney aleti .....                                                                             | 68 |
| Şekil 3.6. Numune Kalıpları (a: silindir kalıp, b: prizma kalıp, c: küp kalıp) .....                              | 69 |
| Şekil 3.7. Plastik kür havuzu.....                                                                                | 70 |
| Şekil 3.8. Beton test presi .....                                                                                 | 70 |
| Şekil 3.9. Hızlı klor geçirimliliği test cihazı .....                                                             | 71 |
| Şekil 3.10. Terazî .....                                                                                          | 71 |
| Şekil 3.11. Vakum ve desikatör .....                                                                              | 72 |
| Şekil 3.12. Taze birim hacim ağırlığı deneyi .....                                                                | 76 |
| Şekil 3.13. Slump (Abrams Konisi) deneyi .....                                                                    | 77 |
| Şekil 3.14. Çökme - Yayılma deneyi .....                                                                          | 78 |
| Şekil 3.15. V hunisi deneyi .....                                                                                 | 79 |
| Şekil 3.16. L kutusu deneyi.....                                                                                  | 80 |
| Şekil 3.17. U kutusu deneyi .....                                                                                 | 81 |
| Şekil 3.18. Su kürü.....                                                                                          | 82 |
| Şekil 3.19. (a): Basınç dayanımı test aleti, (b): Eğilme dayanımı test aleti.....                                 | 83 |
| Şekil 3.20. Hızlı klor iyon geçirimliliği tayini .....                                                            | 85 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 4.1.</b> Numunelerin taze beton birim hacim ağırlıklarının karşılaştırılması ..... | 87  |
| <b>Şekil 4.2.</b> Çökme-yayılma deney sonuçlarının karşılaştırılması.....                   | 91  |
| <b>Şekil 4.3.</b> V-hunisi deney sonuçlarının karşılaştırılması .....                       | 94  |
| <b>Şekil 4.4.</b> L-kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması .....                       | 97  |
| <b>Şekil 4.5.</b> U-kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması .....                       | 99  |
| <b>Şekil 4.6.</b> 28 ve 180 Günlük basınç dayanım sonuçlarının karşılaştırılması .....      | 101 |
| <b>Şekil 4.7.</b> 28 ve 180 Günlük prizma numunelerin eğilme dayanımları .....              | 105 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Hızlı klor iyon geçirimliliği değerlerinin karşılaştırılması .....        | 109 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 2.1. Normal ve ağır beton için basınç dayanım sınıfları.....                                                         | 7  |
| Çizelge 2.2. Beton kıvam ve özellikleri.....                                                                                 | 11 |
| Çizelge 2.3. KYB’de taze beton özelliklerini belirleme yöntemleri.....                                                       | 21 |
| Çizelge 2.4. KYB için beton karışım elemanları tayini için başlangıç<br>parametreleri.....                                   | 29 |
| Çizelge 2.5. KYB için kullanılan malzemelerin sınır değerleri.....                                                           | 30 |
| Çizelge 2.6. KYB deney sonuçları.....                                                                                        | 31 |
| Çizelge 2.7. Sertleşmiş betonun içerisinde değişik nedenlerle oluşmuş olan<br>boşluklar .....                                | 39 |
| Çizelge 2.8. ACI 222R’e göre betonun klorür içeriğinin sınıflandırılması .....                                               | 41 |
| Çizelge 2.9. TS EN 206-1 standardına göre betonun klorür içeriğinin<br>sınıflandırılması.....                                | 42 |
| Çizelge 2.10. Bir yıllık numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımı ve hızlı<br>klor geçirimliliği deneyi sonuçları..... | 49 |
| Çizelge 2.11. UK katkılı KYB’nin basınç ve çekme dayanım sonuçları.....                                                      | 51 |
| Çizelge 2.12. Örneklerin ortalama yayılma çapları .....                                                                      | 56 |
| Çizelge 2.13. Örneklerin basınç dayanım değerleri (MPa).....                                                                 | 56 |
| Çizelge 2.14. Örneklerin klor geçirimlilik değerleri (Coloumb) .....                                                         | 57 |
| Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R çimentonun kimyasal analizi.....                                                                   | 61 |
| Çizelge 3.2. CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve mekanik analizi.....                                                        | 61 |
| Çizelge 3.3. Chryso fluid hp 1106’nın teknik özellikleri.....                                                                | 63 |
| Çizelge 3.4. Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları .....                                                                       | 64 |
| Çizelge 3.5. Uçucu külün fiziksel analiz sonuçları.....                                                                      | 64 |
| Çizelge 3.6. Silis dumanı kimyasal analiz sonuçları .....                                                                    | 65 |
| Çizelge 3.7. Silis dumanı fiziksel analiz sonuçları .....                                                                    | 65 |
| Çizelge 3.8. Geleneksel beton ve KYB grupları için malzeme miktarları.....                                                   | 74 |
| Çizelge 3.9. KYB deneyleri için sınır değerler.....                                                                          | 75 |
| Çizelge 3.10. KYB sınıfları .....                                                                                            | 75 |

|                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Çizelge 3.11. Hızlı Klor İyon Geçirimsilik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimsliliği yönünden değerlendirilmesi .....</b> | <b>84</b>  |
| <b>Çizelge 4.1. Numunelerin taze beton birim hacim ağırlıkları.....</b>                                                               | <b>87</b>  |
| <b>Çizelge 4.2. Geleneksel betonların slump değerleri .....</b>                                                                       | <b>89</b>  |
| <b>Çizelge 4.3. Yayılma çapına göre beton sınıflandırılması .....</b>                                                                 | <b>89</b>  |
| <b>Çizelge 4.4. Yayılma süresine (T<sub>50</sub>) göre belirlenen viskozite sınıfları.....</b>                                        | <b>89</b>  |
| <b>Çizelge 4.5. Çökme-yayılma deney sonuçları .....</b>                                                                               | <b>90</b>  |
| <b>Çizelge 4.6. V-hunisi akış süresine göre belirlenen viskozite sınıfları.....</b>                                                   | <b>93</b>  |
| <b>Çizelge 4.7. V-hunisi deney sonuçları .....</b>                                                                                    | <b>93</b>  |
| <b>Çizelge 4.8. L-Kutusu geçiş yeteneğine göre viskozite sınıfları .....</b>                                                          | <b>95</b>  |
| <b>Çizelge 4.9. L- kutusu deney sonuçları.....</b>                                                                                    | <b>96</b>  |
| <b>Çizelge 4.10. U-kutusu deney sonuçları .....</b>                                                                                   | <b>98</b>  |
| <b>Çizelge 4.11. 28 ve 180 günlük basınç dayanım sonuçları.....</b>                                                                   | <b>100</b> |
| <b>Çizelge 4.12. 28 ve 180 Günlük eğilme dayanım sonuçları .....</b>                                                                  | <b>104</b> |
| <b>Çizelge 4.13. 1. Numunelerin deney sonuçları .....</b>                                                                             | <b>107</b> |
| <b>Çizelge 4.14. 2. Numunelerin deney sonuçları .....</b>                                                                             | <b>108</b> |
| <b>Çizelge 4.15. 3. Numunelerin deney sonuçları .....</b>                                                                             | <b>108</b> |
| <b>Çizelge 4.16. Deney ortalamaları.....</b>                                                                                          | <b>108</b> |

## 1. GİRİŞ

Beton; agrega (kum-çakıl), su, çimento ve ihtiyaca göre katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen başlangıçta işlenebilir kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu katılaşp sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir (Anonim 2009).

İnsanoğlu ihtiyacı için yapılar oluşturmaya başladığı günden beri en büyük sorunu bağlayıcı madde olmuştur. Yapılarda kullanılan ilk bağlayıcı madde çamurdur. Fakat çamur, suyla vb. diğer etkilerle istenilen özelliğini kaybettiği için tam olarak bir bağlayıcı madde olduğu söylenemez. Arayışlar neticesinde ilk olarak camlaşmış silis içeren toprakların kireçle karıştırılması ile ilk bağlayıcılar kısmen elde edilmiştir.

M.Ö. 3000 yıllarında betonun ilkel haliyle kullanıldığı bilinmektedir. Roma İmparatorluğundaki bazı mühendislik yapılarında, Eski Mısırda piramitlerde ve Çin’de Çin Seddi inşasında kullanıldığı tespit edilmiştir. İlkel haliyle beton; öğütülen tuğla parçalarının kireçle karıştırılması sonucu elde edilmiştir. Bu karışım horasan harcı olarak isimlendirilmiş ve Osmanlı döneminde inşa edilen birçok yapıda kullanılmıştır (Duman 2010).

Modern anlamda beton 1824 yılında portland çimentosunun üretilmesi ve 1848 yılında İngiltere’de ilk çimento fabrikasının kurulmasıyla hayatımıza girmiştir. Almanya 1903 yılında hazır beton kullanmaya başlamış, 1916 yılında ise betonun taşınabilmesi için transmikserler geliştirilmiştir (Gündeşli 2008).

Çimentonun keşfinden sonra beton teknolojisi hızla gelişmiş; hidratasyon ısısı, rötre, sünme, priz vb. kavramların açıklanması bu teknolojinin gelişmesinde önemli rol oynamıştır. 19. ve 20. yüzyılda kimyasal, mineralojik ve mekanik yönden yapılan ileri düzey bilimsel araştırmalar sayesinde çimento endüstrisinde ve beton teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Endüstri alanındaki gelişmeler sayesinde çimentoda

çeşitlilik artmış, endüstriyel atıkları beton veya çimento üretiminde değerlendirilmiş ve kimyasal katkılarla beton desteklenerek dayanımlarda önemli artışlar elde edilmiştir. Bu çalışmaların yapılmasında ekonomik faktörlerin yanı sıra, betondan istenen dayanıklılık ve dayanımın yüksek olması yönlendirici olmuştur (Kandemir 2014).

Günümüz yapı malzemelerinin en önemlilerinden birisi betondur. Betonun bu kadar tercih edilmesinin sebebi; ekonomik olması, üretiminin kolaylığı, dayanım ve dayanıklılığının yüksek olması, servis ömrünün uzun olması, istenilen şekil verilebilmesi, yangına karşı direnç, çevre dostu olması vb.'dir. Bu nedenler betonu tüm dünyada tercih edilen bir yapı malzemesi durumuna getirmiştir (Haberal 2010).

Çağımız yapı dünyasında önemli bir yere sahip olan beton; üretiminden uygulanmasına kadar geçen her aşamada son derece itina ve önem gerektiren temel bir yapı malzemesidir. Beton gelişmiş toplumların vazgeçilmez yapı malzemesidir. Yaşam alanları, santraller, barajlar, köprüler, yollar, limanlar, hava alanları vb. birçok mühendislik yapısında beton kullanılmaktadır. Betonun en çok tercih edilen yapı malzemesi olması; kolay işlenebilirliği, ekonomikliği, üretiminin kolaylığı, üretim aşamasında daha az enerjiye ihtiyaç duyması ve estetik olması gibi avantajlarının olmasındandır. Avantajlarının çok olmasına karşın elbette ki betonunda bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şu şekildedir; düşük çekme dayanımı, sabit yük altında deforme olması, mükemmel geçirimsizliğe sahip olmaması, sertleşmiş betonun gevrek özellik göstermesi vb.'dir (Yaşarer 2008).

Betonda kullanılan kimyasal akışkanlaştırıcılar beton üretimi için gerekli olan su ihtiyacını azaltmakta ve betonun daha kolay işlenmesini sağlamaktadır. 21. Yüzyılda geliştirilen süperakışkanlaştırıcı katkıları sayesinde yüksek dayanıma sahip beton üretimi kolaylaşmıştır. Bu akışkanlaştırıcılar ile üretilen beton yüksek dayanımın yanı sıra dayanıklılık ve işlenebilirlik açısından da üstün bir konumdaydı. Üretilen bu beton zaman içerisinde “yüksek performanslı beton” olarak isimlendirilmiştir.

Dayanımı yüksek beton türlerinden biri de kendiliğinden yerleşen betondur. Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), herhangi bir vibrasyona ihtiyaç duymadan yerleştirilen ve sıkıştırılan bir beton türü olarak tanımlanmaktadır.

KYB'ler içerilerindeki yüksek akışkanlaştırıcıdan dolayı vibrasyona ihtiyaç duymaksızın, düşük porozite ile homojenliğini kaybetmeden kalıba yerleşip donatıyı kusursuz bir şekilde sararlar. Donatının yoğun olduğu ve kesitin dar olduğu durumlarda bile segregasyona uğramadan yüksek performans sergileyen akıcı kıvamlı teknoloji ürünü bir beton türüdür (Özkul 2005).

Günümüz betonarme yapılarında yüksek dayanım, dayanıklılık ve hız büyük öneme sahiptir. Bu ihtiyaçları karşılamak için yeni geliştirilen akışkanlaştırıcılar yardımıyla özel betonlar üretilmiştir.

1986 yılında Japonya'da taze betonu yerleştirmek için gerekli olan vibrasyon olayını ortadan kaldırmak için kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kavramı ortaya çıkmıştır (Topçu vd 2007).

KYB geleneksel betona göre taze hal özellikleri bakımından birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlar; kolay işlenebilirlik, vibrasyon ihtiyacı olmaması, çevreye daha az zarar vermesi, zaman tasarrufu vb. sayılabilir. Bunun yanı sıra dezavantajları arasında üretim maliyeti, kalıpta hidrostatik basınç etkisi, düşük su/çimento oranı nedeniyle plastik büzülme çatlaklarının oluşabilmesi, üretim için tecrübe ve deneyimli işçinin olması gerektiği söylenebilir. Üretim maliyetinin yüksek olmasının nedeni kullanılan çimento ve kimyasal katkı miktarının fazla olması söylenebilir.

### **1.1.Amaç ve Kapsam**

KYB homojen yapısı, boşluklarının az oluşu, dayanımının yüksek oluşu ile işçilik yetersizliği ve kalitesizliği nedeniyle oluşacak problemleri en aza indirmesinden dolayı son dönemlerde tercih edilen bir beton türüdür. Sıkıştırma işlemi olmadığından yani

vibrasyona gerek duyulmadığından işçilik nedeniyle oluşacak zararlarda minimum seviyede olabilmektedir. Kullanımı giderek yaygınlaşan kendiliğinden yerleşen betonların üzerinde birçok araştırma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen geleneksel betonlar kadar fazla araştırma yapılmamıştır. Yapılan araştırmaların çoğu da KYB'nin taze beton özellikleri ile ilgilidir. Dayanım, dayanıklılık ve geçirimsizliği ile ilgili araştırmalar taze beton özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalara göre daha azdır.

Bu çalışmamızda betonun dayanım, dayanıklılık ve geçirimsizlik özelliklerinde iyileştirme sağlayan silis dumanı ve uçucu külü KYB üretiminde kullanarak mineral katkıların KYB'de ki dayanım, dayanıklılık ve geçirimsizlik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda geleneksel beton ile farklı oranlarda silis dumanı (%5, %10, %15) ve uçucu kül (%15, %30, %45) ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek kendiliğinden yerleşen beton üretimi gerçekleştirilmiştir. Silis dumanı ve uçucu külün belirli oranlarda çimento ile ikame edilmesiyle üretilen KYB'nin taze beton deneyleri yapılmıştır. Ayrıca 28 ve 180 günlük sertleşmiş beton deneyleri olan basınç dayanım deneyi, eğilme dayanım deneyi ve hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar değerlendirilerek KYB'nin taze beton özelliklerinin, kalıcılık özelliklerinin iyileştirilmesi ve daha ekonomik olarak üretilmesi amaçlanmaktadır. Silis dumanı ve uçucu külün hangi oranlarda maksimum dayanım ve minimum geçirimsizlik sağladığı araştırılmaktadır. Endüstriyel atık olan silis dumanı ve uçucu külün beton içerisinde kullanılmasıyla; çimento tüketiminin azaltılması, atık kullanımıyla daha çevreci bir beton üretimi ve ihtiyaçlarımızı karşılayan kalıcılık özelliklerine sahip beton üretilmesi hedeflenmektedir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Geleneksel Beton

Beton; agrega, çimento, su ve katkı maddelerinin (mineral, fiber, kimyasal vb.) belirli oran ve şartlarda karıştırılmayla elde edilen ve şekil verilebilen kompozit bir yapı malzemesidir. Betonun prize başladığı ana kadar geçen süreye (plastik kıvamdaki beton) “Taze Beton”, prizden sonra ise “Sertleşmiş Beton” olarak tanımlanır. Betonda çimento hamuru tüm ince agregayı, harç ise tüm kaba agregayı bütünüyle kaplamış olması gerekmektedir. İşlenebilme, dayanım ve durabilite (kalıcılık) betonun kısa ve uzun vadede istenilen özellikleri sağladığını gösteren önemli parametreleridir (Özel 2007).

Etrafımızda ki birçok yapıda betonun yaygın olarak tercih edilmesinin nedeni diğer yapı malzemelerine göre avantajlarının dezavantajlarına göre daha fazla olması söylenebilir. Betonun diğer yapı malzemelerine göre avantajlı olmasının nedenlerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- ✓ Taze betonun plastik davranışından dolayı istenilen şekil ve boyutlardaki elemanlar kolayca üretilebilmektedir.
- ✓ Beton yerinde üretilebileceği gibi, bir fabrikada önceden üretilerek sertleşmiş beton elemanı olarak ta kullanılabilir.
- ✓ Yerleştirme yöntemlerinde çeşitlilik ve kolaylık vardır.
- ✓ Basınç dayanımı yüksektir.
- ✓ Çevre etkilerine karşı diğer yapı malzemelerinin çoğundan dayanıklıdır.
- ✓ Bakım işlemi ve masrafı gerektirmemektedir.
- ✓ Çelik donatılarla iyi bir aderans (kenetlenme) gösterebilecek özelliğe sahiptir.
- ✓ Ekonomiktir.
- ✓ Estetik amaçlarla kullanılmaya elverişlidir.

Betonun bu avantajlarının yanı sıra diğer yapı malzemelerine göre dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Sertleşmiş betonun çekme dayanımı düşüktür.
- ✓ Gevrek özellik gösterir.
- ✓ Çevre koşullarının etkisiyle ıslanma-kuruma veya sıcaklık farkları karşında bir miktar hacim değişikliğine uğrar.
- ✓ Sabit yükler altında kalıcı deformasyona uğrar.
- ✓ Geçirimsizliği mükemmel olmadığından dolayı içerisine su veya zararlı madde içeren sular sızarak dayanıklılığını azaltabilir.
- ✓ Dayanım/Ağırlık oranı metallerde olduğu gibi yüksek değildir (Erdoğan 2003).

İnşa edilmiş veya edilmekte olan yapıların bulundukları ortam koşulları ve hizmet süreleri değişkenlik gösterir. Bu değişikliklere uyum sağlanabilmesi için beton teknolojisi sürekli olarak kendini yenilemiştir. Son yıllarda betonun durabilite (kalıcılık) ve mekanik özellikleri teknoloji ile birlikte gelişme göstererek birçok beton çeşidi üretilmiştir. Tüm bu çeşitliliğe rağmen betonlar normal beton ve özel beton olarak iki grupta başlıklandırılmışlardır.

### 2.1.1. Geleneksel betonun sınıfları

Betonlar birim ağırlıklarına göre üç ana gruba ayrılırlar;

a) Normal Beton: Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu),  $2000 \text{ kg/m}^3$  ile  $2600 \text{ kg/m}^3$  aralığında olan betonlara normal beton denir. En çok taşıyıcı amaç için kullanılırlar.

b) Hafif Beton: : Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu),  $800 \text{ kg/m}^3$  ile  $2000 \text{ kg/m}^3$  aralığında olan betonlara hafif beton denir. Yapılarda yalıtım sağlamak veya dayanımı yüksek ağırlığı hafif olması istenen işlerde kullanılırlar.

c) Ağır Beton: : Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu), 2600 kg/m<sup>3</sup>'ten daha büyük olan betonlara ağır beton denir. Sığınak ve nükleer enerji santrallerinde kullanılır. Özel agregalar kullanılarak üretim gerçekleştirilir (Özkul vd 2004).

Betonlar TS EN 206-1'de belirtilen basınç dayanımlarına göre sınıflandırıldığında; normal ve ağır betonlar için Çizelge 2.1'de verilen sınıflar uygulanmaktadır. Standartta belirtilen dayanım sınıflarının dışında ki özel durumlarda ilgili tasarım standardının izin vermesi şartı ile Çizelge 2.1'de verilen dayanım sınıflarının ara değerleri de kullanılabileceği belirtilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Normal ve ağır beton için basınç dayanım sınıfları (TS EN 206-1)

| Basınç dayanım sınıfı | En düşük karakteristik silindir dayanımı (MPa) | En düşük karakteristik küp dayanımı (MPa) |
|-----------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| C 8/10                | 8                                              | 10                                        |
| C 12/15               | 12                                             | 15                                        |
| C 16/20               | 16                                             | 20                                        |
| C 20/25               | 20                                             | 25                                        |
| C 25/30               | 25                                             | 30                                        |
| C 30/37               | 30                                             | 37                                        |
| C 35/45               | 35                                             | 45                                        |
| C 40/50               | 40                                             | 50                                        |
| C 45/55               | 45                                             | 55                                        |
| C 50/60               | 50                                             | 60                                        |
| C 55/67               | 55                                             | 67                                        |
| C 60/75               | 60                                             | 75                                        |
| C 70/85               | 70                                             | 85                                        |
| C 80/95               | 80                                             | 95                                        |
| C 90/105              | 90                                             | 105                                       |
| C 100/115             | 100                                            | 115                                       |

Betonda basınç dayanımı en fazla araştırılan konudur. Bunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

✓ Beton basınç dayanımı yapıların tasarımındaki temel unsurdur. Yapı tasarımlarında betonun çekme, yorulma ve eğilme gibi yüklere maruz kalmayacağı kabul edilerek,

betonun basınç yüklerini karşısındaki davranışı esas alınıp tasarım bu davranışlara göre yapılır.

✓ Betonun basınç dayanımının bilinmesiyle çekme ve eğilme dayanımları korelasyonla yaklaşık olarak bulunabilir.

✓ Basınç dayanımının bilinen betonun diğer özellikleri de tahmin edilebilir. Örneğin basınç dayanımı yüksek olan betonların geçirimsizliği az, dayanıklılığı yüksektir (Anonim 2002).

### 2.1.2. Geleneksel betonun tasarımı

Beton tasarımındaki en önemli iki kriter kalite ve ekonomikliktir. Beton üretiminde kaliteden ödün vermek söz konusu olamaz. Bu yapı güvenliğini tehlikeye atar, can ve mal kayıplarına neden olur. Bunun yanında üretilen betonun ekonomik olması da kalite kadar önem arz etmektedir.

Beton tasarımında dikkate alınması gerekenler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ İşlenebilme ve kıvam
- ✓ Dayanım
- ✓ Dayanıklılık (durabilite)
- ✓ Birim ağırlık
- ✓ Hidratasyon Isısı
- ✓ Ekonomi
- ✓ Donatı yoğunluğu
- ✓ Su/Çimento oranı
- ✓ Malzeme Özellikleri (çimento özgül ağırlığı, elek analizleri, en büyük agrega tane boyutu vb.) (Erdoğan 2003).

### 2.1.3. Taze betonun özellikleri

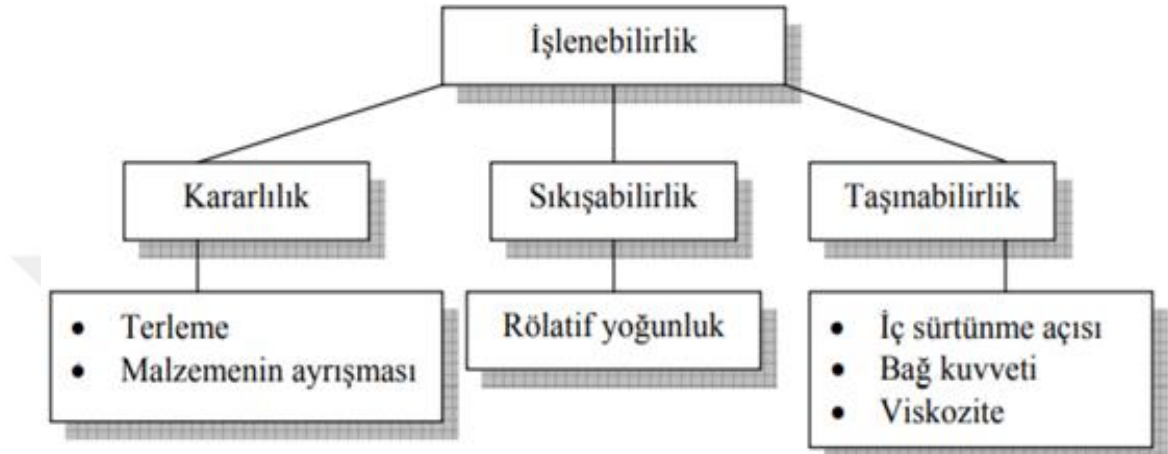
Agrega, su ve çimentonun (gerektiğinde katkı maddelerinin) karıştırılması sonucunda elde edilen beton şekil verilebilir ve yumuşak kıvamdadır. Ancak su ve çimentonun birleştiği anda başlayan kimyasal reaksiyon (hidratasyon) devam ettiği sürece çimento hamuru (ve beton) giderek katı bir hal almakta ve belirli bir süre sonunda işlenemez (şekil verilemez) hale gelmektedir. Betonun priz süresini tamamlayıp sertleşmiş durumdaki halini aldıktan sonra istenilen dayanım, hacim sabitliği ve dayanıklılığı elde edebilmesi için taze betonun bazı şartları sağlaması gerekmektedir. Bu şartlar şu şekilde sıralanabilir.

- ✓ Beton bünyesindeki malzemeler, beton içerisinde homojen olarak dağılmalı ve beton kolayca karılabilir olmalıdır.
- ✓ Taze beton, homojenliği bozulmadan kolayca taşınabilir olmalıdır.
- ✓ Taze beton, kolayca sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltilebilir olmalıdır.
- ✓ Taze betonun içerisinde bulunan su, hidratasyon olayının devam edebilmesi için, mümkün olan en uzun süre beton bünyesinde kalmalı, yüzeye çıkarak kaybolmamalıdır (Suyun beton yüzeyine çıkması terleme olarak bilinir). Taze beton, olabildiğince az terleme göstermelidir.
- ✓ Taze betonun priz süresinin uzunluğu betonun kullanılacağı ortama uygun şekilde olmalıdır (Betonda ki malzemelerin karılmasıyla şekil kazanan taze beton karılma işlemi bittiği andan itibaren katılaşmaya başladığı süreye priz alma süresi denir).
- ✓ Taze betonun üretilip, yerine yerleştirilmesi esnasında iri agreg a ile çimento harcı arasında segregasyon olmamalıdır (Erdoğan 2003).

### İşlenebilme, Kıvam ve Segregasyon (Ayrışma)

İşlenebilme; betonun en az kayıpla homojenliğini kaybetmeden kolayca taşınabilmesi, yerine yerleştirilebilmesi, sıkıştırılması ve yüzeyinin düzeltilebilmesi özelliklerinin tamamını içinde barındıran tek bir özellik olarak ifade edilebilir.

Taze betonun en önemli özelliği olan işlenebilirlik betonun sertleştiğinde yeterli dayanım ve dayanıklılığını etkileyen önemli bir etkidir. İşlenebilirlikle ilgili Şekil 2.1’de ne tür özelliklerin dikkate alınması gerektiği gösterilmiştir.



**Şekil 2.1.** İşlenebilmeyi oluşturan elemanlar

Beton karışımının sahip olduğu ıslaklığı, kalıp yardımıyla istenilen şeklin verilebilecek akışkanlıkta olması, az enerji ile sıkıştırılabilmesi, üretilip priz alana kadar segregasyon olmaması, taşınabilmesinin kolay olması, yüzey düzgünlüğünün kolay sağlanması betonun işlenebilirlik özelliği altında yer alan kavramlardır. İşlenebilirlik homojenliği koruma, boşluksuz yerleşme, minimum enerji ve kıvam kavramlarını içine alır. İşlenebilirlik konusunda ki amaç taze betonda ki sürtünmeyi yenerek kolay yerleşmesini sağlamaktır. İşlenebilirlik ise, betonun ayrışma göstermeden istenilen görünüşü sağlamasıdır. İşlenebilirlik özelliği iyi olan bir betonun niteliklerinin başında kohezyon (yapışma) gelmektedir. Kohezyonu iyi derecede olan bir taze beton içindeki iri agrega taneleri; karıştırma, taşıma ve yerleştirme işlemleri sırasında ayrılmazlar. Yapılan bu işlemler sırasında (taşıma, karıştırma, yerleştirme vb.) iri agreganın beton külesinden ayrılmasına betonun çözülmesi (segregasyon) adı verilmektedir. Segregasyon olayı tasarlanan beton dayanımının istenilen seviyede olmasına engel olur (Haberal 2010; Anonim 2004, Erdoğan 2004).

Kıvam; taze betonun ıslaklık derecesi anlamına gelmektedir. Kıvam kavramı betonda ki su miktarı olarak algılanmamalıdır. Betonun ne ölçüde ıslak veya kuru olduğunu belirtir. Kıvam taze betonun akıcılığı veya kendi ağırlığı ile hareket etme kabiliyeti ile ilgili bir özelliktir. Kıvamlarına göre taze betonlar, plastik, kuru ve akıcı olmak üzere üçe ayrılırlar (Erdoğan 2003). Çizelge 2.2’de betonun kıvamı ile ilgili özellikleri verilmektedir.

**Çizelge 2.2.** Beton kıvam ve özellikleri (Şimşek 2004)

| Kıvam        | Çökme |            | Ve – Be |           | Sıkışabilme |             | Yayılabilme |            | Özellikleri                                                                                                               |
|--------------|-------|------------|---------|-----------|-------------|-------------|-------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | Sınıf | mm         | Sınıf   | mm        | Sınıf       | Derecesi    | Sınıf       | Çapı mm    |                                                                                                                           |
| Nemli Toprak | S1    | 10-40      | V0      | $\geq 31$ | C0          | $\geq 1,46$ | F1          | $\leq 340$ | Su miktarı çok az, vibrasyonla özenli ve kuvvetli bir şekilde yerleştirilmediği takdirde betonda boşluklar kalır.         |
| Sıkı         | S2    | 50-90      | V1      | 30-21     | C1          | 1,45-1,26   | F2          | 350-410    | Vibrasyonla sıkıştırmaya elverişli, betonarme yapılar için uygun.                                                         |
| Plastik      | S3    | 100-150    | V2      | 20-11     | C2          | 1,25-1,11   | F3          | 420-480    | Donatının fazla olması halinde seçilir.                                                                                   |
| Akıcı        | S4    | 160-210    | V3      | 10-6      | C3          | 1,10-1,04   | F4          | 490-550    | Su miktarı fazla, vibrasyonla sıkıştırmaya elverişli değil. Çok sık donatı bulunması halinde kullanılmasına izin verilir. |
| Şerbet       | S5    | $\geq 220$ | V4      | 5-3       |             |             | F5          | 560-620    | Su; agrega ve çimentodan kolaylıkla ayrılır. Betonarmede bu kıvama sahip beton kullanılmamalıdır                          |

Bugüne kadar işlenebilme özelliğini belirleyebilmek için bir çok ampirik deney yöntemleri önerilmiş fakat bu yöntemlerden hiç biri taze betonun işlenebilme özelliğini tam olarak ölçememiştir. Buna rağmen taze betonun kıvamını (işlenebilirliğinin) tespit etmek için deneysel yöntemler mevcuttur. Bunlardan bazıları;

✓ Çökme deneyi

- ✓ Ve-be deneyi
- ✓ Sıkıştırma faktörü deneyi
- ✓ Akıcılık deneyi (sarsma tablası deneyi )
- ✓ Sıkıştırılabilme derecesi deneyi
- ✓ Yayılma tablası deneyi (Erdoğan 2003).

Taze betonda ince tanelerin yukarı doğru hareketi ve kaba tanelerin aşağı doğru hareketi segregasyonu açıklayan bir diğer ifade şeklidir. Betonda segregasyona yol açan nedenler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Malzeme oranları ve özellikleri; taze betonu oluşturan malzemelerin uygun özellikte olmaması, uygun oranlarda katılmaması ve malzeme dağılımının homojen bir şekilde yapılmaması.
- ✓ Betonda kullanılan malzemelerin karılmasının yeterli olmaması; homojen bir karışım elde edilmediğinde.
- ✓ Taze betonun taşınması, yerleştirilmesi ve sıkıştırılması uygun tarz ve sürede yapılmaması; gereğinden az ya da fazla süreyle yapılan işlemler (Erdoğan 2003).

#### **2.1.4. Geleneksel betonda basınç dayanımı**

Betonda basınç dayanımı eksenel basınç yükü etkisi altında sertleşmiş betonun kırılmamak için göstermiş olduğu direnç (eksenel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme) olarak tanımlanmaktadır. Basınç dayanımı betonun en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Betonun mukavemet değerleri arasında basınç dayanımı yüksek, çekme dayanımı ise düşüktür. Bundan dolayı beton sadece basınca çalıştırılır. Yüksek basınç dayanımına sahip betonun su geçirgenliği az, dış etkilere karşı dayanıklı, kompasitesi yüksek ve aşınması az olur. Betonun dayanımını artırmak için su/çimento oranı düşürülmelidir. Çünkü beton bünyesinde ki su belli bir miktardan sonra arttıkça dayanımı düşürmektedir. Su/çimento oranı azaldıkça betonun mukavemeti artmaktadır. Basınç dayanımını etkileyen bir başka faktör ise betonun kompasitesidir. Betonun kompasitesi arttıkça dayanımın arttığı, betonda ki boşluğun %10 artması dayanımın

%50-60 civarında düşmesi demektir. Kompasiteyi artırmak için karışım suyunu azaltmalı, ideal bir agrega granülometresi belirlemeli ve etkili bir sıkışma metodu uygulanmalıdır (Haktanır vd 1991; Erdoğan ve Şimşek 2004 ).

Betonun basınç dayanımını belirleyebilmek için değişik deney yöntemleri uygulanmaktadır. Bu deney yöntemlerinden en çok kullanılanları şunlardır:

- ✓ Betonun taze haldeyken hazırlanan standart boyutlu numunelerin standartlarda belirtilen süre ve koşullarda kür edildikten sonra kırılmaya tabi tutuldukları “Standart deney yöntemi ”.
- ✓ Beton taze haldeyken hazırlanan numunelerin bir-iki gün süreyle yüksek sıcaklık ve nem içeren ortamda kür edilerek kırıldıkları “ hızlandırılmış kür’e tabi tutulan numunelere uygulanan basınç dayanımı yöntemi ”.
- ✓ Sertleşmiş numunelerin kesilerek alınan karot numunelerin kırılmasıyla elde edilen “karot numunelere uygulanan basınç dayanımı yöntemi ”.
- ✓ Beton test çekici ile sertleşmiş beton yüzeyine uygulanarak hasarsız olarak yüzey sertliğini ölçen beton basınç dayanımı hakkında bir bilgi elde edilen “beton test çekici uygulayarak basınç dayanımının bulunduğu deney yöntemi ”.
- ✓ Ultrasonik test cihazı ile sertleşmiş betonun içerisinden hasarsız olarak geçen ses dalgalarının hızının ölçüldüğü ve betonun basınç dayanımı hakkında bilgi veren “ ultrasonik test cihazı uygulayarak basınç dayanımının bulunduğu deney yöntemi ”(Erdoğan 2004)

#### 2.1.5. Geleneksel betonda durabilite

Durabilite; bir betonun kullanım süresi boyunca özelliklerini iç ve dış etkilere karşı koruyabilmesi yeteneğidir. Dış etkiler olarak; atmosfer etkisi, donma etkisi, suların etkisi, bitki köklerinin etkisi, darbe ve kullanımdan kaynaklanan aşınma etkileri olarak açıklanabilir. İç etkiler olarak ise beton bileşenlerinden kaynaklanan ısıl genleşme, rötre, hacim artışı, nemlenme, çiçeklenme gibi etkilerdir. Betonda dayanıklılık çimento miktarına ve bileşimine bağlı bir özelliktir. İklim şartlarına, ıslanma-kurumaya, kimyevi tesirlere, yangına (ateş) vb. durumlara karşı direnç gösterip özelliğini kaybetmeyen

betonlar dayanıklı beton olarak adlandırılır. Beton kullanılacağı yapının özelliklerine uygun olarak tasarlanmış, gerekli kalite koşullarını sağlamış, uygun şekilde yerleştirilmiş, sıkıştırılmış ve kür edilmiş ise tasarım ömrü boyunca herhangi bir onarıma ihtiyaç duymaz. Dayanıklı beton iç ve dış etkilere rağmen kendisinden beklenen performansı düşürmeyen betondur. Betonun içerisindeki boşluklar ne kadar az ve geçirimsiz ise durabilite yönünden o kadar iyidir. Yani durabilite ve geçirimsizlik birbiriyle bağlantılı olan iki olaydır. Betonda geçirimsizliği azaltan ve çimentodan daha ince olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik malzemeler ile yeni nesil akışkanlaştırıcılar birlikte kullanılarak daha geçirimsiz beton üretilir. Bu malzemeler kullanılarak üretilen betonlarda su/çimento oranı düşük, buna karşın üretilen betonların durabilitesi ve dayanımı yüksektir. Tabi bu durum kür koşulları iyi sağlanmış betonlar için geçerlidir (Haberal 2010).

Beton kullanım süresi boyunca birçok fiziksel ve kimyasal etkiye maruz kalır. Beton bünyesine sızan su, oksijen, karbondioksit, asit, sülfat ve klorür gibi maddeler betonda kimyasal reaksiyonların oluşmasına neden olurlar. Beton bünyesindeki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki kimyasal reaksiyonlar sertleşmiş betonun genişerek yıpranmasına yol açar. Suya doymun haldeki beton donma olayı sonucunda içsel gerilmelere maruz kalır. Bu gerilmeler betonda biçim ve hacim değişimine neden olmaktadır. Betonun istenilen dayanıklılık özelliklerini gösterebilmesi için kullanılan agreganın sağlamlığı, betonun gözenekliliği, su geçirgenliği, agrega dane şekli, granülometri, yüzey pürüzlülüğü, elastiklik modülü, termik genleşme katsayısı, mineral yapısı, en büyük dane boyutu ve agrega temizliği gibi faktörler göz önünde tutulmalıdır.

Betondaki bozulma nedenleri fiziksel ve kimyasal olarak ikiye ayrılır:

Priz almış çimento hamurunun sürtünmeye karşı direnci düşüktür. Tekrarlı sürtünme etkisi altında çimento hamurunun porozitesi yüksek ise ve aşınmaya karşı direnci düşük agrega kullanılmışsa betonun ömrü kısa olur. Beton da basınç dayanımı 28 MPa altında ise dayanıklı yüzeyler elde etmek mümkün olmayabilir. Su içerisinde inşa edilecek yapılar için basınç dayanımı 48 MPa ve üzeri olan betonlar kullanılmalıdır. Bu betonlar

projelendirilirken poroziteye, su miktarına ve kimyasına, yoğunluğa, suyun akış hızına vb. özelliklere dikkat edilmelidir. Beton boşlukların da meydana gelen magnezyum sülfat, sodyum sülfat, kalsiyum klorür ve potasyum nitrat tuzları gibi tuz kristallerinin neden olduğu betonda parçalanma, çatlama ve hacim artışı gibi fiziksel etkenler betonda hasara yol açmaktadır. Donma – çözülme etkisinde olduğu gibi hacimsel farklılıklar betona zarar verir (Doğruyol 2017).

Kimyasal olarak betonun bozulması ise dış ortamda bulunan zararlı maddelerin beton bünyesine girerek çimento hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girmesi ve beton üretimi esnasında çimento, agrega ve suda bulunan kimyasalların uygun koşullarda tepkimeye girmeleri sonucunda oluşur. Çimento hamuru içerisinde yüksek oranda  $K^+$ ,  $Na^+$  ve  $OH^-$  iyonlarının bulunmasından dolayı bazik özelliğe sahiptir. Bundan dolayı asidik ortamlarla karşılaştıklarında kimyasala reaksiyona girme eğilimi gösterirler. pH değeri 12,5'den düşük olan ortamlarda beton kimyasal reaksiyona girme eğilimi gösterir. Bu reaksiyonlar betonun bağlayıcı özelliğini sağlayan kalsiyumun bünyeden çözülmesine, hacmin artmasına ve su ile ayrılarak uzaklaşan ürünlerin oluşmasına neden olarak betona zarar verirler. pH değeri 6'nın altında ve geçirimsizliği yüksek olan betonların kimyasal etkileşim hızı fazladır. pH değerinin 6'nın altında olması betonun kimyasal reaksiyona girmesini kolaylaştırır. Betonda meydana gelen kimyasal reaksiyonlar porozite ve permeabiliteyi artırarak fiziksel bozulmaya da neden olur. Fiziksel ve kimyasal bozulmanın birlikte olması betonda çatlamaya, parçalanmaya ve ayrılmaya neden olur. Bu durum betonun dayanımını olumsuz etkiler (Baradan vd 2002).

#### **2.1.6. Geleneksel betonda geçirimsizlik özellikleri**

Boşluklu bir yapıya sahip olan betonun içinden basınç altında akışkan geçişi olağandır. Basınç olmadan da doğal koşullarda kılcal etki sayesinde su geçirimsizliği meydana gelebilir. Betonda oluşacak bu tür olumsuzlukları engellemek için kullanılan betonun geçirimsizlik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Betonun geçirimsizliğini tespit edebilmek için; kılcal su emme, basınçlı geçirimsizlik ve klorür geçirimsizliği gibi deneyler yapılabilmektedir (Haberal 2010).

Betonun geçirimsiz ve boşluksuz oluşu kalıcılık yönünden önemlidir. Beton boşluk oranı ne kadar düşükse geçirimsizliği de o kadar düşük olur. Çimentodan daha inceliğe sahip olan uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi malzemeler akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılması sayesinde de geçirimsiz ve dayanıklı beton üretilmesine olanak sağlamışlardır. Akışkanlaştırıcı malzemeler beton da su/çimento oranını düşürerek geçirimsizliği sağlamaktadır (Haberal 2010).

Mikro yapısal özellikler betonun dayanıklılığını etkilemektedir. Beton geçirimsizliği durabilite ile yakından ilgilidir. Nedeni ise geçirimsiz beton zararlı maddeleri bünyesine daha kolay alır. Bu maddelerde betonda korozyona, klor nüfuzuna ve karbonatlaşmaya neden olur. Geçirimsizliği düşük beton elde etmek için gradasyona, çimento türüne, su/çimento oranına, su içeriğine ve yerleştirilmesi sırasında uygulanacak olan kalite prosedürlerine dikkat edilmelidir. Su/ çimento oranı ve beton harcının karışması sırasındaki su miktarı betonun geçirimsizliğinde önemli rol oynar. Yapılan laboratuvar çalışmalarında su/çimento oranı düştükçe birim ağırlığın, kılcal su emmenin, geçirimsizlik ve kompozitenin arttığı görülmüştür (Haberal 2010).

Betondaki boşluk ve çatlaklar; yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terlemesi, buharlaşma olayları, katkı maddeleri eklenmesi ve beton teknolojisi üretimindeki kurallara uyulmaması gibi etkenlerden dolayı oluşur. Betondaki ve çimento hamurundaki boşluklar; kapiler, makro ve mikro olarak gruplandırılabilir. Durabiliteyi kılcal ve makro boşluklar en fazla etkileyen etkenlerdir (Baradan vd 2002).

## **2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)**

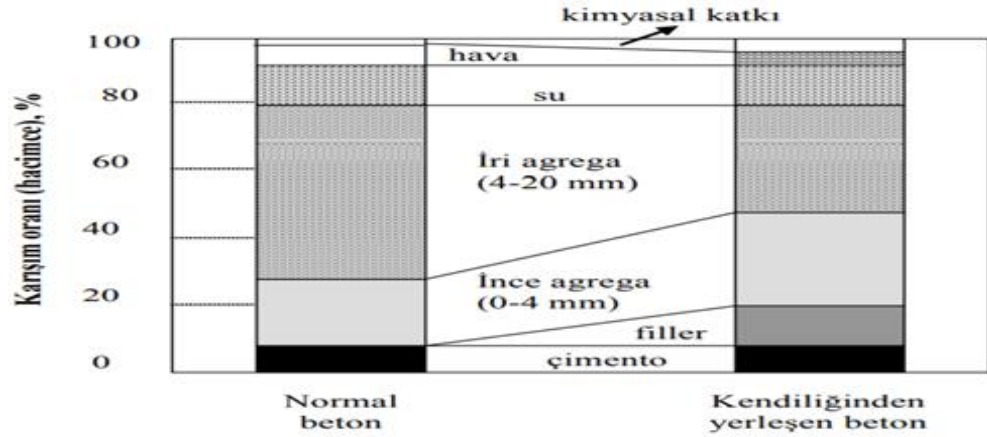
Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı ile sık donatılı ve geçişin zor olduğu dar kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma, kuma ve yüzey düzgünlüğü gibi problemler yaratmayarak kohezyonunu (stabilitesini) koruyabilen, akıcı kıvamına sahip özel bir beton türüdür.

Kendiliğinden yerleşen beton kalıp içerisine hiçbir vibrasyon yapılmadan tamamen sıkışarak yerleşir, donatının etrafını tamamen sararak beton içerisinde çok az miktarda boşluk oluşmasını sağlar. Kendiliğinden yerleşen betonlar klasik betonlardan dizayn olarak da farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar; viskozite arttırıcı katkı, kimyasal katkı, fazla miktarda inert veya puzolanik mineral katkının tümünün veya bir kısmının kullanılması şeklindedir.

KYB kavramı ilk olarak 1986 yılın da Tokyo Üniversitesinde Prof. Dr. Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır. Su altı yapılarında ki beton dökümü uygulamalarında, vibrasyon kullanılmadan beton dökümlerinde elde edilen deneyimler ile KYB üretilmesi amaçlanmıştır. Okamura'nın çalışmalarına Ozawa, Ouchi ve Maekawa da çalışmaları ile katkı sağlamış ve bu çalışmaları devam ettirmişlerdir. 1988 yılında aynı üniversitede yüksek dayanımlı KYB proto tipi üretilmiş ve mekanik olarak incelenmiştir. Bu özel betonun geliştirilmesinde ki amaç dayanım özelliğinin yanı sıra dayanıklılık açısından da yüksek performans sağlamaktır. KYB'nin aşağıdaki belirtilen 3 aşamada belirli şartları sağlaması öngörülmüştür.

- 1- Taze halde iken kendi ağırlığı altında sıkışabilme.
- 2- Oluşabilecek ilk olumsuz etkilere karşı yüksek erken dayanım.
- 3- Sertleşmiş durumda iken dış etkilere karşı bozulmadan kalabilme.

Kimyasal katkı teknolojisinin gelişmesi ile birlikte su altı beton uygulamalarından edinilen bilgi doğrultusunda KYB'nin ortaya çıkması sağlanmıştır. Şekilde 2.2'de GB ile KYB arasında ki karışım oranları yönünden karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 2.2. Normal beton ile KYB'nin karşılaştırılması (Felekoğlu 2003)

Japonya ve diğer ülkelerde KYB'nin hazır beton sektöründe yaygın olarak kullanılmasını artırmak amacıyla aşağıdaki konularda çalışmalar sürdürülmektedir.

- ✓ Kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri
- ✓ Karışım dizaynı yöntemleri
- ✓ Deneylerin şantiye ortamına aktarılması

Prof. Dr. Ferguson'un 1996 yılında yaptığı çalışmalar Kuzey Amerika'da KYB ile ilgili yapılan çalışmaların öncüsü olmuştur. Prof. Dr. Aitcin ve arkadaşlarının yapmış olduğu KYB ile ilgili çalışma ise Kanada'da öncü olmuştur. 1997 yılında RILEM tarafından KYB ile ilgili araştırmalar yapan bir komisyon kurulmuştur. Yine 1997 yılında Hollanda'da KYB kullanımına başlamıştır. Almanya 1998 yılından itibaren KYB'ye ilgi göstermiştir. 2000 yılı sonunda Amerika'da KYB kullanımı yaygın hale gelmiştir. Ülkemizde ise KYB 2000'li yılların başından itibaren kullanılmaya ve geliştirilmeye başlanılmıştır (Sönmez 2008).

### 2.2.1. KYB'nin özellikleri

KYB özel tip beton türü olarak sayılabilir. Büyük boyutlara sahip inşaatlarda, dar kesit ve sık donatının bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, yol üst yapısında, bakım, tamir

ve yenileme işlerinde, tünel vb. özel imalat gerektiren işlerde kullanılan KYB henüz normal beton kadar yaygın olarak kullanılmamaktadır. KYB'nin geniş bir kullanım alanına sahip olmamasının nedenleri; yüksek maliyet, dizayn ve uygulama alanlarında farklı yöntemler gerektirmesi gösterilebilir. KYB geleneksel beton kullanımının teknik olarak mümkün olmayacağı durumlarda kullanılabilir. Üretiminde uygulanan yöntemlerin geliştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunlara örnek verecek olursak; bakım ve onarım işlerinde ki dar kesit ve sık donatılı vibratör uygulamasının mümkün olmayacağı durumlarda KYB kullanımı en akılcı çözüm olmaktadır (Felekoğlu 2003).

KYB'nin kullanımının geleneksel betona göre getireceği avantajları şöyle sıralayabiliriz:

- ✓ KYB mekanik ve durabilite özellikleri bakımından yüksek performansa sahiptir.
- ✓ KYB homojenliğini koruyan segregasyona karşı direnci yüksek ve mükemmel şekil değiştirebilen bir betondur.
- ✓ Sıkışma ihtiyacı olmadığından dolayı vibratör kullanımından kaynaklanan zaman, enerji, gürültü kirliliği ve para kaybı ortadan kalkmış olacaktır.
- ✓ Betonun kendi ağırlığı altında boşluk bırakmadan sık donatılı, dar ve derin kesitlere kolayca yerleşmesi betonun mekanik performansına katkı sağlayacaktır.
- ✓ Perdahlanabilirliği ve yüzey düzgünlüğü elde edilmesi geleneksel betona göre daha iyidir.

KYB'nin kullanımının geleneksel betona göre getireceği dezavantajları şöyle sıralayabiliriz:

- ✓ KYB'nin performansı malzeme oran ve tipine göre daha hassas değişiklikler gösterir.
- ✓ Normal betona göre daha sık ve dikkatli kontrol edilmesi gerekir.
- ✓ KYB bünyesinde daha fazla miktarda toz malzeme bulundurduğundan dolayı boyutsal stabilitesi kullanılan toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar doğurabilir.

✓ KYB belli bir süreden fazla karıştırılırsa akıcılığı artar ve viskozitesi düşer (Felekoğlu 2003).

### 2.2.2. KYB sınıfları

KYB’de yüksek akışkanlık yeni nesil akışkanlar ile sağlanmaktadır. Yüksek akıcılık özelliğinin yanında stabilite özelliğinin istenilen seviyede olmasını sağlayabilmek için parçacık boyutu genellikle 0,125 mm’den küçük toz malzemeler (EFNARC 2005) yoğun olarak kullanılmaktadır. KYB’nin aynı zamanda dar engeller arasından geçiş kabiliyetinin de yüksek olması gerekmektedir. Bunun sağlanabilmesi için geleneksel sıkıştırma özelliği gösteren betona göre hamur hacminin daha yüksek, toplam agrega miktarı daha düşük ve en büyük agrega çapı ise sınırlı (EFNARC 2005’e göre  $D_{max} = 20$  mm’den düşük) düzeyde olmalıdır. KYB’nin viskozite, akıcılık ve geçiş yeteneği özelliğinin belirlenebilmesi için çeşitli deneysel yöntemler belirlenmemiştir. Buna rağmen bu temel özelliklerin dolaylı olarak belirlenebildiği bazı test yöntemleri geliştirilmiştir (Yardımcı 2007).

Gürdal vd (2004) bu test yöntemlerini üç grup olarak belirtmişlerdir.

**Doldurma Yeteneği:** Taze halde ki KYB’nin kendi ağırlığı altında stabilitesini kaybetmeden hareket edebildiğinden dolayı kalıp içerisinde hiç boşluk bırakmaz veya çok az miktarda boşluk bırakarak maksimum sıkışma elde eder ve kalıbı tamamıyla doldurur. KYB’nin bu özelliği şekil değiştirme ve deformasyon özelliklerini etkilemektedir. İyi bir şekilde deforme olması istenilen KYB’de ince agrega, iri agrega ve bağlayıcılar dahil katı tanecikler arasında sürtünmenin azaltılması gerekmektedir. KYB’nin işlenebilirlik ve reolojik özelliğine doldurma yeteneği doğrudan katkı sağlamaktadır.

**Geçebilme Yeteneği:** Yeterli akıcılığa ve aynı zamanda ayrışmaya karşı yüksek dirence sahip olan taze halde ki KYB’nin donatılar arasından rahatça geçebilmesi ve hiçbir

işleme maruz kalmadan donatıları tamamen homojen bir şekilde sarabilmesi yeteneğidir.

**Ayrışmaya karşı direnç:** Karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri sırasında taze halde bulunan betonun bileşen malzemelerinin homojen olmayacak şekilde birbirinden ayrılmasına karşı gösterilen direnç olarak tanımlanmaktadır.

KYB ayrışmaya karşı dirençli olmasının yanı sıra üniformaluluğunu korumalıdır. Üretilen bir betonun KYB olabilmesi için yukarıda verilen doldurma yeteneği, geçebilme yeteneği ve ayrışmaya karşı direnç gibi özelliklere sahip olması gerekmektedir. KYB'lerin istenilen özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneyler aşağıdaki Çizelge 2.3'de verilmektedir.

**Çizelge 2.3.** KYB'de taze beton özelliklerini belirleme yöntemleri (EFNARC 2005).

| Belirlenen özellik     | Deney                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Doldurma yeteneği      | Çökme – yayılma,<br>İlk 50 cm'lik çapa ulaşma süresi<br>V – kutusu akış süresi |
| Geçebilme yeteneği     | L – kutusu<br>U – kutusu<br>Doldurma kutusu<br>J - halkası                     |
| Ayrışmaya karşı direnç | T <sub>5</sub> dak. da v- kutusu akış süresi<br>Elekt ayrışma deneyi           |

EFNARC 2005 komitesi sınıflandırma işlemini, her taze beton deneyi için belirtilen değer aralıklarında kalması halinde uygun olacağını vurgulamıştır. Bu değerlerin aşılması durumunda taze halde bulunan KYB'nin reolojik açıdan kararlılığının bozulma olasılığı vardır.

Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO 2005) tarafından taze halde ki KYB'nin istenilen kararlılıkta ve karakteristik özellikte olması için bir sınıflandırma yöntemi geliştirilmiştir. KYB'nin sınıflandırılması yapılan farklı deneylerde farklı harfler verilerek yapılmıştır. Yapılan sınıflandırma özelliklerine göre verilen harfler ve bunlara ait simgeler ile kullanıldığı yerler hakkında bilgi aşağıda verilmiştir.

- ✓ Akıcılık, SF
- ✓ Viskozite, VS ya da VF
- ✓ Geçebilme yeteneği, PA
- ✓ Ayırışma direnci, SR

SF1 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Pompa enjeksiyon sistemi ile dökme (ör: tünel kaplaması)
- ✓ Küçük kesitlerde ki uzun yatay akışların engellenmesi durumunda (ör: kazıklar ve bazı derin temeller)
- ✓ Betonun belirli bir mesafeden, üstten döküldüğü donatısız ya da çok az donatılı beton yapılar (ör: konut döşemeleri)

SF2 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Yapılarda ki birçok yerde kullanıma uygun olan kendiliğinden sıkışan ve yerleşen beton türüdür (ör: duvarlar, kolonlar)

SF3 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Karmaşık şekillere sahip ve yoğun donatılı yapılarda düşey uygulamalar ya da kalıp altından doldurma gerektiren yerlerde kullanılır. En büyük agrega tane boyutunu 16 mm olarak sınırlandırılması önerilen sınıf türüdür. 850 mm'den fazla çökme-yayılma değerine sahip betonların özel durumlar halinde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kullanılacak olan betonda en büyük iri agrega boyutunu 12 mm olarak sınırlandırılmıştır.

VS1 veya VF1 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Yoğun donatılı ve yüzey düzgünlüğü istenilen yapılarda uygun kıvam özelliğine sahip beton türüdür.

VS2 veya VF2 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Bu sınıfta ki betonlarda çökme yayılma veya V-kutusu akma süresinde ki artmadan dolayı kalıp basıncının azaltılması istenilen yerlerde.

PA1 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Sargı aralığı 80 ile 100 mm açıklıkta olan yapılarda (konut veya düşey yapılar) kullanılan beton türüdür.

PA2 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Sargı aralığı 60 ile 80 mm açıklıkta olan yapılarda (inşaat mühendisliği yapıları) kullanılan beton türüdür.

SR1 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

- ✓ Bu tür betonlar genellikle döşeme kalınlığı düşük olduğu yerlerde, akma uzunluğunun 5 cm'den az ve sargı aralığının 80 mm'den daha fazla olduğu yapılarda kullanılır. Bunlar; duvarlar, kazıklar, uzun ve narin yapılar, rampalar vb. düşey uygulamalar olarak örnek verilebilir.

SR2 sınıfındaki KYB'lerin kullanım yerleri:

✓ Akma uzunluğu 5 cm'den büyük ve sargı aralığı 80 mm'den büyük olan yapılarda yayılma sırasında meydana gelebilecek ayrışma riskini azaltmak için düşey uygulamalarda bu beton türü kullanılır. Ayrıca akma uzunluğunun 5cm'den daha az olup, sargı aralığı 80 mm'den az olması durumunda da bu beton türü tercih edilmelidir (Topçu vd 2007).

✓ SF, VF ve VS kıvam sınıflarında ki KYB betonunun yapılarda kullanım yerlerini kıvam özelliklerine göre aşağıdaki Şekil 2.3'de verilmiştir (Aharı 2014).

| Viskozite                                        |                     |     |     | Ayrışma direnci veya geçme yeteneği        |
|--------------------------------------------------|---------------------|-----|-----|--------------------------------------------|
| VS2<br>VF2                                       | Rampalar            |     |     | SF1 ve SF2 için geçme yeteneğini belirtmek |
| VS1 yada VS2<br>VF1 yada VF2<br>yada hedef değer | Duvar ve kazıklar   |     |     | SF3 için SR belirtmek                      |
| VS1<br>VF1                                       | Katlar ve döşemeler |     |     | SF2 ve SF3 için SR belirtmek               |
|                                                  | SF1                 | SF2 | SF3 |                                            |
|                                                  | Çökmede yayılma     |     |     |                                            |

**Şekil 2.3.** Çeşitli uygulama alanları için KYB kıvam özellikleri (Aharı 2014)

### 2.2.3. KYB'nin taze beton özellikleri

#### İşlenebilirlik

Betonda akma gerilmesi, kararlılık, içsel sürtünme, ayrışma, terleme, viskozite, yerleşebilirlik, perdahlanabilirlik, akma ve deformasyon yeteneğini belirten özellik işlenebilirlik ile sağlanır. Bu özellikleri belirlerken bazıları reolojik yöntemlerle tespit edilirken bazıları ise amprik deneylerle tespit edilir. Taze betonda işlenebilirliği etkileyen bazı faktörler şunlardır:

- ✓ Agrega özelliği (dane şekli, çapı, dokusu)
- ✓ Çimento özellikleri
- ✓ Karışımın su muhtevası
- ✓ Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu
- ✓ Süper akışkanlaştırıcı, priz geciktirici veya hava sürükleyici katkı kullanılması
- ✓ Lif kullanılması
- ✓ Granülometrik özellikler

Taze haldeki betonun işlenebilirlik özelliğini etkileyen bu parametreler birbirleriyle bağımsız olarak değil de bir bütün olarak davranmaktadır (Demirci 2012).

#### Yerleşebilirlik

Betonun istenilen mekanik ve durabilite özelliklerini sağlayabilmesi için iyi yerleştirilme işleminin istenilen şekilde yapılması gerekmektedir. KYB sayesinde taze halde bulunan beton kendi ağırlığı altında ek enerji gerektirmeden (ek maliyet ve gürültü olmadan) sık donatılı ve dar kesitlerden geçerek kendiliğinden yerleşebilecektir. Betonun sık donatılı, dar ve derin kesitlerden daha kolay geçerek boşluk bırakmadan yerleşebilmesi betonun mekanik ve durabilite özelliklerini istenilen seviyede tutacaktır (Felekoğlu 2003).

### Ayrışmaya Karşı Direnç

Beton bünyesinde bulunan iri ve ince agregaların dağılımının düzensiz olmasına karşı gösterilen direnç olarak ifade edilebilir. Ayrışma meydana gelen betonlarda sertleşme olduktan sonra bozulan dağılım düzeni sebebiyle çatlaklar görülebilir. Bu durum betonun basınç dayanımını ve geçirimsizlik özelliğini olumsuz olarak etkilemektedir. KYB tasarımı yapılırken kullanılacak toz malzeme miktarında yapılacak artış ya da viskozite artırıcı katkı maddeleri ayrışmaya karşı direnci artıracaktır (Yılmaz 2007).

Kararlılığı azaltıp ayrışma riskini artıran etkenler:

- ✓ En büyük agrega boyutu 40 mm civarında olması ve boşluklu granülometriye sahip olması
- ✓ Çimento hamuru miktarının azlığı
- ✓ Gereğinden fazla akışkanlaştırıcı katkı kullanılması,
- ✓ Agrega karışımında bulunan kum oranının, inceliğe bağlı olarak %30-40 dan az olması
- ✓ Yüksek su/çimento oranı nedeniyle çimento hamurunun viskozitesinin düşmesinden dolayı betonun, agrega dağılımını sağlayacak bir kohezifliğe sahip olmaması

Ayrışma riskini azaltıp, kararlılığı artıran etkenler:

- ✓ Hava sürüklenme katkıları
- ✓ İnce malzeme oranının artırılması
- ✓ Agrega granülometrisinin sürekli olarak aynı şekilde olması ve en büyük tane çapının küçük olması
- ✓ Karışımdaki sıvı fazını yoğunlaştırıcı katkıların kullanılması

#### 2.2.4. KYB tasarım yöntemleri

KYB’de deney yöntemleri ile tasarım yöntemleri araştırmaları bu beton türünü standart bir beton türü haline getirmiştir. KYB’de tasarım yapılırken genellikle hamur ve harç fazı üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bunun nedeni KYB’de hamur fazının normal betona göre fazla olması ve KYB’nin karakteristik özelliğini bu fazların belirlemiş olmasıdır. EFNARC’ın 2005 yılında yayınlamış olduğu “Specification and Guidelines for SCC” isimli doküman gerek duyulan tüm bilgileri içermektedir. Bu doküman da KYB’de tasarım yapılırken bazı ilkeler göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlar:

- ✓ Hava miktarı istenilen düzeyde seçilmeli
- ✓ Kaba agreganın hacmi belirlenmeli
- ✓ İnce agreganın hacmi belirlenmeli
- ✓ Pasta bileşenlerinin belirlenmeli
- ✓ Hamurdaki su/toz oranı ve kimyasal katkı miktarı optimum seviyede belirlenmeli

KYB’den istenilen düzeyde performans sağlayabilmek için iri agreganın miktarı sınırlı seviye de tutulmalıdır. Aynı zamanda karışım viskozitesi ve hamur miktarı da yüksek tutularak betonda oluşacak ayrışmaya karşı direnç, yüksek işlenebilirlik yeteneği, sık donatılı ve dar kesitlerden betonun geçiş yeteneğini üst seviyede tutulmuş olur. Bu özelliklerin sağlanabilmesi için karışımın su/bağlayıcı oranı düşük tutulmalı ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak istenilen şekil alabilme yeteneği sağlanmalıdır.

KYB’de tasarım yapılırken üç farklı yöntem kullanılmaktadır.

Arttırılmış ince malzeme yöntemi

Viskozite arttırıcı madde kullanma yöntemi

Her iki yaklaşımın karışımı yöntemi

Birinci yöntemde betonun hamur ve harç fazı dikkate alınır. Betonun yayılma ve ayrışmaya karşı göstereceği direnç bünyesindeki çimentonun inceliği veya kullanılan

daha ince malzeme miktarının arttırılmasıyla sağlanmaktadır. İnce malzemenin bir bölümü çimentodan oluşurken, bir kısmı da daha ince olan silis dumanı, uçucu kül, öğütölmüş kalker, yüksek fırın cürufu vb. maddelerden oluşmaktadır.

İkinci yöntemde betonun içerisindeki ince malzeme oranında artış yapmak yerine viskozite artırıcı katkı (VAK) kullanılarak istenilen özellik elde edilmektedir.

Üçüncü yöntem ise ilk iki yöntemin karması olarak ortaya çıkmıştır. Bu şekilde üretilen betonlarda ince malzeme oranında az bir artış yapılmakta ve düşük bir oranda VAK kullanılmaktadır (Aharı 2014).

Yukarıda verilen tasarım yöntemlerinin asıl hedefi KYB'nin 65-80 cm yayılabilme özelliğini sağlamak, işlenebilir özelliğini kaybetmesini engellemek, bu özellikleri sağlarken de betonun terleme ve ayrışmasını engellemektir. KYB hacimsel olarak %50 kaba agrega %50 harçtan oluşabilmektedir. %50'lik harç kısmında %30 su, %40 ince agrega ve %30 çimento bulunmaktadır. Su/Çimento oranını düşük tutabilmek ve işlenebilirlik süresini artırabilmek için hiperakışkanlaştırıcı katkı olarak polikarboksilik eter esaslı katkıları kullanılabilir. Tasarıma göre kullanılması önerilen malzeme oranları Çizelge 2.4'de verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** KYB için beton karışım elemanları tayini için başlangıç parametreleri

| No | Parametre                                                    | İstenen özellikler                                                                                                                                                                           |
|----|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Düşük iri agregası içeriği                                   | Birim hacim kütlelerinin %50 si                                                                                                                                                              |
| 2  | Toplam ince malzeme (0,1 mm den küçük malzemelerin toplamı)* | 500 – 600 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                  |
| 3  | Kum içeriği (0,1 mm den büyük)                               | Harç hacminin %40'ı                                                                                                                                                                          |
| 4  | Agrega en büyük tane boyutu                                  | En fazla 20 mm                                                                                                                                                                               |
| 5  | Çimento dozajı                                               | En az 350 kg/m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                  |
| 6  | Su/ince malzeme oranı (hacimce)                              | 0,9-1,2                                                                                                                                                                                      |
| 7  | Katkılar                                                     | Bir süperakışkanlaştırıcı, kullanmak, tercihen polikarboksilat eter esaslı (üreticinin tavsiyesi), hava sürükleyici katkı (üreticinin tavsiyesi) viskozite modifiye edici madde, %0,1 (Ç+UK) |
| 8  | Yayıma değeri                                                | 60-70 cm                                                                                                                                                                                     |
| 9  | V – hunisi                                                   | D <sub>max</sub> = 15 mm için 8 – 12 sn<br>D <sub>max</sub> = 20 mm için 11 – 15 sn                                                                                                          |
| 10 | U – kutusu                                                   | H > 30 cm                                                                                                                                                                                    |
| 11 | L – kutusu                                                   | H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub> > 0,8                                                                                                                                                         |
| 12 | Kajima doldurma kutusu                                       | >%90 doldurma kabiliyeti                                                                                                                                                                     |

\*0,1 mm den ince malzeme içerisine çimento, uçucu kül, cüruf, silis dumanı, kireçtaşı tozu veya kuvars veya herhangi inert filler malzemeler girer

KYB tasarımında kullanılan agregası granülometresin de ki kaba-ince agregası oranı geleneksel betondakine göre azaltılmalıdır. Bağlayıcı miktarı ise artırılmalıdır. Kaba-İnce agregası oranının azaltılması ve bağlayıcı madde miktarının artırılmasındaki amaç kaba agregasının daha fazla harç ile sarılmasını sağlayarak betona kendi ağırlığıyla hareket edebilme kabiliyeti kazandırmaktır. KYB de su ile çimento bileşimi (pasta) agregaların taşınmasını sağlayan bir araçtır. Bu özelliğin sağlanabilmesi için agregası hacmi pasta hacminden az olmalıdır. Yeni nesil süper akışkanlaştırıcı (YNSA) kullanılarak, düşük su/toz oranı elde edilir. Bu da betonda pasta miktarını artırır. KYB de kullanılan YNSA miktarı geleneksel betonda kullanılan miktardan fazla olmalıdır.

Eğer betonun hareketini (akıcılığı) sağlayacak oranda ince malzeme kullanılmazsa YNSA ile birlikte viskozite düzenleyici katkı kullanılmalıdır. Bu durumda Çizelge 2.5’de ki tasarım yöntemleri kullanılabilir (Topçu 2007).

**Çizelge 2.5.** KYB için kullanılan malzemelerin sınır değerleri (EFNARC 2005)

| Bileşen       | Ağırlıkça Miktar<br>(kg/m <sup>3</sup> )                                                           | Hacimce Miktar<br>(l/m <sup>3</sup> ) |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Toz           | 380 – 600                                                                                          | 300 – 380                             |
| Pasta         |                                                                                                    | 150 – 210                             |
| Su            | 150 – 210                                                                                          | 270 – 360                             |
| Kaba agregası | 750 – 1000                                                                                         |                                       |
| İnce agregası | 1 m <sup>3</sup> ’te geri kalan hacmi doldurmalıdır, toplam agregası ağırlığının %48 ile %55’idir. |                                       |
| Su/toz oranı  |                                                                                                    | 0,85 – 1,10                           |

Avrupa KYB şartnamesine göre 600 kg ince malzeme kullanılarak KYB üretilebileceği gibi mineral katkı kullanılmadan 380 kg çimento ile de KYB üretilebilir. Kaba agregada herhangi bir üst sınır verilmemesine rağmen betonun geçme ve yerleşme özelliklerini artırmak için üst sınır 16 mm alınması önerilmektedir (Topçu 2007).

KYB tasarımında ince malzemenin iki ana görevi vardır. Birincisi ince malzeme yayılmaya yardımcı olur ve ikincisi ise ince malzeme ayrışma direncini sağlamaktadır. İnce malzeme miktarı araştırmaları için İTÜ de çökme-yayılma deneyleri yapılmıştır. İnce malzeme miktarının 500 kg/m<sup>3</sup>’ün altında olduğu durumlarda ayrışma eğilimi olduğu gözlenmiştir. Yapılan deneyler neticesinde 550 kg/m<sup>3</sup>’ün optimum değer olduğu, kalker tozu ve uçucu külün çimentonun bir kısmıyla yer değiştirebileceği sonucuna varılmıştır. Çizelge 2.6’da KYB deney sonuçları verilmiştir (Özkul vd 1999).

**Çizelge 2.6.** KYB deney sonuçları

| Çimento+taş tozu (kg/m <sup>3</sup> ) | Su/çimento | Katkı oranı (%) | Süre (dakika)                | Yayılma (cm)               | Gözlem        |
|---------------------------------------|------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|---------------|
| 450+0                                 | 0,37       | 1,5             | Ani                          | 55                         | Ayrışım       |
| 500+0                                 | 0,38       | 1,5             | Ani<br>30<br>60<br>90<br>120 | 56<br>56<br>57<br>58<br>45 | Hafif Ayrışma |
| 550+0                                 | 0,36       | 1,5             | Ani<br>30<br>60<br>90<br>120 | 65<br>65<br>63<br>66<br>65 | Ayrışma Yok   |
| 450+150                               | 0,33       | 2,5             | Ani<br>30<br>60<br>90<br>120 | 73<br>74<br>70<br>65<br>49 | Ayrışma Yok   |

Yapılan çalışmalar neticesinde kazanılan deneyimler KYB üretmek için tasarım yapılırken bazı limitlerin oluşmasına olanak sağlamıştır. Bu limitler hacimsel olarak aşağıda verilmiştir.

- ✓ Betonda kullanılan iri agrega hacmi beton hacminin %30-34'ü civarında olmalıdır. Bu değerler geleneksel betonda kullanılan miktarın çok altındadır
- ✓ Su/bağlayıcı oranı 0,8-1,2 olarak kullanılmalıdır. Bu sınır değerlerin betonun akışkanlığını etkilediği durumlarda viskozite artırıcı bir katkı kullanılması tavsiye edilmektedir.
- ✓ Viskozite artırıcı katkı kullanılmadığı durumlarda 155-175 lt/m<sup>3</sup> su miktarı ideal miktardır. Fakat viskozite artırıcı katkı ile bu su miktarı 200 lt/m<sup>3</sup>'e kadar çıkabilir.
- ✓ Beton hacminin %34-40'ı çimento fazı hacmi olmalıdır
- ✓ Betonda ki harç fazı hacminin %40-50'si ince agrega hacmi olarak belirlenmelidir.

Verilen tüm bu değerler ışığı altında, ağırlık olarak aşağıdaki miktarlar önerilebilir (Gürdal vd 2004).

İri agregâ miktarı : 750-920 kg/m<sup>3</sup>

İnce agregâ miktarı : 710-900 kg/m<sup>3</sup>

Bağlayıcı miktarı : 450-600 kg/m<sup>3</sup>

Su miktarı : 150-200 kg/m<sup>3</sup>

EFNARC (2005)'de KYB'de kullanılan kaba agregâ miktarını 750-1000 kg/m<sup>3</sup>, toz madde miktarını da 380-600 kg/m<sup>3</sup> civarında olması gerektiğini belirtmiştir (Yardımcı 2007).

KYB tasarımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar ve kazanılan deneyimler doğrultusunda KYB tasarımının da karışıma tek bir deney üzerinden karar vermek yerine; viskozite, akıcılık, geçiş yeteneği ve ayrışma direnci parametreleri dikkate alınarak karışımın dizaynına karar verilmelidir. KYB'de kullanılacak malzemelerin özellikleri TS EN 206-1 standardında belirtilen özelliklere uygun seçilmelidir.

#### **2.2.5. KYB'de taze ve sertleşmiş beton deneyleri**

KYB'nin bazı değerlerinin ölçülmesi ve ölçülen değerlerin standartlarda verilen aralıklarda kaldığının tespit edilebilmesi gerekmektedir. Bu özellikler;

- Doldurma Kabiliyeti
- Geçme Kabiliyeti
- Ayrışmaya Karşı Direnç'tir.

Bu değerlerin ölçülebilmesi için bazı deney metotları geliştirilmiştir. KYB'de taze ve sertleşmiş halde ki beton özelliklerinin incelenebilmesi için uygulanan deney yöntemleri aşağıda verilmiştir.

**Taze beton deneyleri****Çökme – Yayılma Deneyi**

KYB'nin yayılma kabiliyetini (doldurma kabiliyetini) gözlemleyebilmek için kullanılan deney yöntemidir.

**V Hunisi Deneyi**

KYB'nin ayrılmaya karşı göstereceği direnci ve doldurma kabiliyetinin gözlemlendiği deney yöntemidir.

**U Kutusu Deneyi**

KYB'nin kendi ağırlığının etkisiyle donatı çubuklarının arasından geçebilme kabiliyetinin gözlemlendiği deney yöntemidir.

**L Kutusu Deneyi**

KYB'nin kendi ağırlığı altında yerleşmesini, doldurma yeteneğini, geçiş yeteneğinin ve ayrılmaya karşı göstereceği direncinin gözlemlendiği deney yöntemidir.

**Sertleşmiş beton deneyleri**

KYB'nin mekanik, fiziksel ve durabilite (kalıcılık) özelliklerinin belirlendiği deney türleri geleneksel betonda ki deneylerle aynıdır. Bunlar; basınç dayanımı deneyi, çekme dayanımı deneyi, eğilme dayanımı deneyi, birim hacim ağırlık deneyi, su emme deneyi, boşluk oranı belirleme deneyi, kılcal geçirimsizlik deneyi, boy değişimi deneyi, mikro yapı incelemeleri deneyi, kimyasal analiz, klor iyon geçirimsizlik vb. deney türleridir.

### 2.2.6. KYB'nin sertleşmiş beton özellikleri

#### KYB'nin basınç dayanımı

KYB'de basınç dayanımı geleneksel betonda da olduğu gibi istenilen özellikte ki betonu sağlama açısından önemli bir kriterdir. Fakat KYB'nin taze halde ki yerleşebilirlik kriterleri de aynı derecede önem arz etmektedir. KYB'de basınç dayanımı için S/Ç oranı belirlemede geleneksel beton dizayn yöntemlerinde kullanılan tabloların ilk yaklaşım için kullanılabileceği belirtilmiştir. KYB'de ilk yaklaşımda alınan S/Ç oranı genellikle istenilen dayanımdan daha fazla dayanım elde edilmesini sağlamıştır. Bunun sebebi olarak ise KYB'de kullanılan ilave toz malzemenin karışımdaki suyu tutarak düşük S/Ç oranını sağlamasıdır. KYB'de kullanılan toz tipleri ve miktarları değişken olduklarından dolayı (taş tozu, uçucu kül, silis dumanı ve yapay cüruflar vb.) dayanım sınıfı-su/çimento ilişkisini genellemek doğru bir yaklaşım olmaz. Yapılan çalışmalarda 300-350 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajı, 500-600 kg/m<sup>3</sup> toplam toz dozajına sahip olan, farklı su ve akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak kendiliğinden yerleşebilirlik özellikleri sağlanan betonların 28 günlük basınç dayanımları 60-80 MPa'ya kadar ulaşabildikleri söylenmiştir. Kısacası KYB'nin basınç dayanımı bileşen özelliklerinin değişiklik göstermesi bakımından önceden öngörülememektedir. Üniorm yapısı nedeniyle KYB'nin basınç dayanımı homojen bir dağılım özelliği gösterir.

#### KYB'nin çekme dayanımı

KYB'de beton dayanım sınıfına göre ve olgunluk değerine göre çekme dayanımının basınç dayanıma paralel özellikler gösterdiği yapılan araştırmalar doğrultusunda belirtilmiştir. Basınç dayanımı yüksek olan KYB'lerin çekme dayanımlarıda yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fakat az miktarda da olsa KYB'nin çekme dayanımı, boşluk yapısının homojen olarak dağılması ve sıkıştırma enerjisi neticesinde ortaya çıkan mikro yapı kusurlarının ortadan kalkması sonucunda geleneksel betona göre daha fazladır (Acay 2010).

### **KYB’de sünme**

Sünme; sabit gerilme altında zaman içinde oluşan deformasyon (birim şekil değiştirme) olarak tanımlanabilir. Sünme çimento hamurunda meydana geldiğinden dolayı su/çimento oranı ile direkt ilgili olan çimento hamuru boşluklarına bağlıdır. Hidratasyon sırasında çimento hamurunda ki boşluklar azaldığından dolayı betonda dayanım artarken sünme de azalma meydana gelecektir. KYB’de daha yüksek miktarda çimento hamuru olduğu için sünme katsayısı aynı dayanımda ki geleneksel betona göre daha fazla olacaktır (Anonim 2007).

### **KYB’de rötre (büzülme)**

Beton da rötre, priz sırasında meydana gelen hidratasyon ısısının betonun bünyesindeki suyu azaltması sonucu oluşan hacimsel azalmadır. Betonda çekme gerilmeleri oluşmasına neden olur ve otojen rötre meydana gelir. Kuruma rötresi ise betondan atmosfere doğru hareket eden suyun kaybolması neticesinde oluşur. KYB’ler düşük su/çimento oranına sahip olduklarından dolayı kuruma rötresi azalırken otojen büzülme kuruma rötresini aşabilmektedir. KYB’de rötrenin sebep olduğu deformasyon sünmenin sebep olduğu deformasyondan daha yüksek olabilmektedir (Anonim 2007).

### **2.2.7. KYB’de dayanım ve dayanıklılık (Durabilite)**

Betonun dayanıklılığı yüzey tabakasının geçirgenlik özelliği ile yakından ilgilidir. Yüzey tabakası betona zarar verecek hareketlerin başladığı ve bu hareketlerin ilerlemesine neden olan maddelerin betona girişinin olduğu kısımdır (CO<sub>2</sub>, Alkaliler, Sülfat, Klorür, Su, Asitler vb.). Donatılar arasındaki mesafenin az olması, kalıbın dar ya da derin olması, beton içerisine yerleştirilen diğer elemanlar arasında ki boşluk vibrasyon uygulaması yapılmasına engel olarak betonun yüzey tabakasının istenilen şekilde olmasını engeller. Buda çevre koşullarına maruz kalan betonun dayanıklılık bakımından performanslarının zayıf olmasına neden olan temel faktör olarak kabul edilmektedir. Japonya’da KYB’nin gelişiminin temel nedenlerinden biri bu problemin

üstesinden gelebilme özelliğidir. Geleneksel betonda vibrasyon olmadan istenilen sıkışma elde edilemeyeceğine göre vibrasyon kullanılması şarttır. Vibrasyonla istenilen şekilde bir sıkıştırma elde edilmediği için geçirimsizlikleri az olan bir beton üretilmesine olanak sağladığını söyleyemeyiz. Bu yüzden zararlı maddelerin betona girişine engel olunulamadığını söyleyebiliriz. Bir diğer etken olarak da yanlış vibrasyon kullanımından kaynaklanan (segregasyon, terleme, peteğimse delikler vb.) geçirgenlik ve dayanım açısından betonu olumsuz etkilemektedir. Doğru şekilde tasarımı yapılan ve üretilen KYB’de yukarıda sayılan eksikliklerin hiçbir tanesi oluşmayacak, tutarlı bir şekilde düşük ve üniform geçirgenliğe, çevreden gelen zararlı etkilere karşı daha az zayıf noktaya sahip olacak ve dayanıklılığı yüksek bir beton elde edilmiş olacaktır.

KYB’nin durabilite özellikleri, içeriğindeki toz malzeme miktarından ve türünden etkilenmektedir. Örnek vermek gerekirse uçucu kül ikamesi yüksek olan (ortalama %60 civarında) ve silis dumanının %10 olduğu durumlarda KYB’nin durabilite (donma-çözünme, klor iyon geçirimsizlik) özelliği artış göstermektedir (Yazıcı 2008).

#### **2.2.8. KYB’de geçirimsizlik**

Betonun geçirgenliği, çimento hamuru ile agrega ara yüzeyindeki mikro ölçekteki kılcal çatlakların ve beton içerisinde var olan boşlukların bir fonksiyonudur. Beton geçirimsiz ve boşluksuz olması durabilite açısından önemlidir. Geçirimsizlik poroziteden, beton içerisindeki boşluk boyutlarından, boşluk yüzeylerinin pürüzlülüğünden etkilenir. Beton içerisindeki boşluk boyutu ne kadar büyük ise geçirimsizlikte o kadar büyük olur. Buda zararlı maddelerin beton içerisine daha kolay sızmasını sağlar. Çimento hidratasyon hızı yüksek olursa geçirimsizlik düşük olabilir. Hidratasyon zamanla gelişirse betonun geçirimsizliği de zamanla azalır.

Beton bünyesine sızan sular ve yabancı maddeler betonda bazı zararlı kimyasal ve fiziksel olaylara neden olurlar. Bunlar şu şekilde sıralanabilir;

Çimento hamurunun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit, beton içerisinde sızan suların etkisiyle çözünerek yüzeye çıkmaktadır. Bu durum betondaki boşluk oranını artırmaktadır.

Beton içerisine sızan sulardaki asit ve sülfatlar, beton içerisinde genleşmeye neden olan ürünlerin oluşmasına neden olabilir.

Beton içerisinde donatı mevcutsa sızan sular donatıların korozyona uğramasına neden olabilirler. Korozyon demir donatıların kesitlerinde azalmaya neden olabilir. Ayrıca donatı üzerinde korozyondan dolayı oluşan yan ürünler genleşmeye neden olabilir.

Beton içerisindeki kapiler boşluklar suyla dolup donması durumunda betonda büyük genleşmelere neden olurlar.

Betonda geçirimsizlik şu önlemlerin alınmasıyla azaltılabilir:

- ✓ Agrega maksimum dane çapını küçültmek
- ✓ Karma suyu miktarının ideal seviyede tutulması
- ✓ Gerekli olan çimento oranından düşük oranda çimento kullanmamak
- ✓ Beton kürünün iyi yapılması
- ✓ Uygun katkı kullanmak

KYB’de mineral katkıların kullanılmasıyla beton klor iyon difüzyonuna karşı dirençli hale gelebilir. Raghavan’ın yapmış olduğu deneyler sonucunda hızlı klor iyonu penetrasyon deneyi ile dayanım sınıfları aynı olan geleneksel beton ile KYB kıyaslanmış, KYB’de 1500 coulomb, geleneksel betonda ise 4000 coulomb değerleri bulunmuştur. Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi KYB geleneksel betona göre daha geçirimsizdir (Sönmez 2008).

KYB'nin akışkanlığını artırmak için bazen fazla miktarlarda akışkanlaştırıcı kullanılması gerekebilir. Kullanılan fazla miktardaki akışkanlaştırıcı KYB'nin mikro yapısını değiştirebilir. Mineral fillerin bulunması KYB'nin düşük poroziteye ve daha yoğun mikro yapıya sahip olmasına neden olur.

Gözenek yapısı, su/çimento oranı ve hidratasyon derecesinden önemli ölçüde etkilenir. Hidratasyon derecesi arttıkça hidratasyon neticesinde oluşan ürünler KYB içindeki boşlukları daha fazla doldururlar. Su/çimento oranının düşük olması da iletkenliğin ve kapiler porozitenin azalmasına neden olacaktır. Süper akışkanlaştırıcılar sayesinde KYB'deki gözenek yapısı incelmıştır. Özellikle polikarboksilat içerikli olanlarda bu durum daha net gözlenmektedir. Geleneksel betondan daha yoğun bir mikro yapıya sahip KYB'nin yapılan görüntü analizlerinden (MIP ve BSE) yola çıkarak oluşturulan çalışmalarda kritik gözenek hacmi, gözenek boyut dağılımı ve toplam gözenek hacmi açısından Yüksek Performanslı Beton (YPB)'lar ile benzer özellikler sergilediği belirtilmiştir.

Betonun geçirimliliği büyük ölçüde çimento hamurunun geçirimliliğine bağlıdır. Su/çimento oranı çimento hamurunun geçirimliliğini etkileyen en önemli parametredir. Su çimento oranı azaldıkça çimento hamurunun zamana bağlı geçirimlilikte meydana gelen düşüş çok daha hızlı olmaktadır. Ayrıca hidratasyon olayının gelişimi çimento hamurunun geçirimliliğini etkilemektedir. Hidratasyon yapmış çimento hamurundaki jel hacmi, hidrate olamamış hacimden daha büyük olması dolayısıyla jel içi su dolu olan boşlukları doldurur ve geçirimliliği azaltır (Baradan vd 2002).

Betonun boşluk yapısı Çizelge 2.7'de verilmiştir. Betonda oluşan makro gözenekler yetersiz sıkıştırma ve betona katılan hava sürükleyici katkıları nedeniyle oluşurlar. Betonda ki kapiler boşluklar ve daha büyük çaptaki boşluklar elastisitesini ve dayanımını olumsuz yönde etkiler. Bu boşluklar aynı zamanda geçirimsizlik içinde zararlıdır. Mikro seviyede ki boşluklar her ne kadar rötreye ve sünmeye etki etse de dayanıma etki etmezler (Demirci 2012)

**Çizelge 2.7.** Sertleşmiş betonun içerisinde değişik nedenlerle oluşmuş olan boşluklar (Erdoğan 2003)

| İsmi              |                      | Hidrolik yarıçap | Karakteristiği                |
|-------------------|----------------------|------------------|-------------------------------|
| Makro boşluklar   | İri boşluklar        |                  | Boş                           |
| Kapiler boşluklar | Makro kapilerler     | < 1mm            | Emme: Ani                     |
|                   | Meso kapilerler      | < 30 µm          | Emme: Dakikadan haftalara     |
|                   | Mikro kapilerler     | < 1 µm           | Makroskopik denge yoktur      |
| Mikro boşluklar   | Meso jel boşlukları  | < 30 mm          | Hacimden yüzey fizikine geçiş |
|                   | Mikro jel boşlukları | < 1 mm           | Yüzey fiziki                  |

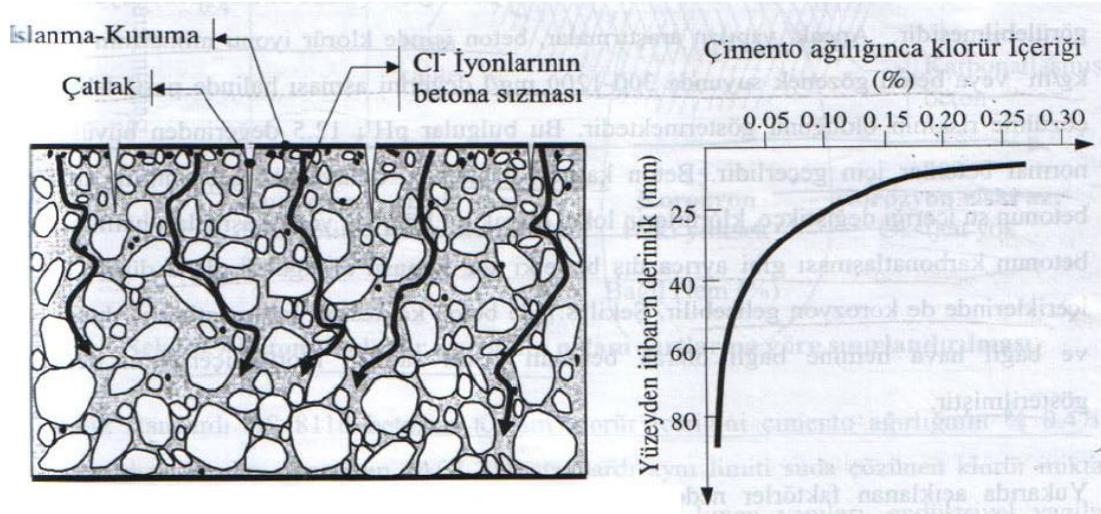
Betonun sertleşmiş halde içerisinde farklı nedenlerden dolayı oluşmuş olan boşluklar şunlardır;

- ✓ Sertleşmiş çimento hamurunda yer alan kapiler ve jel boşlukları.
- ✓ Hava sürükleyici katkı kullanılan betonlar da çimento hamurunda oluşan hava kabarcıkları
- ✓ Betonda oluşan terleme nedeniyle yüzeye çıkan suyun sertleşmiş çimento hamurunda neden olduğu boşluklar; üst tarafa hareket eden suyun iri agrega tanelerinin altlarında birikmesiyle oluşan boşluklar.
- ✓ Çimento hamurunun priz alması nedeniyle oluşan büzülmenin, çimento hamuru ve agrega taneleri arasın da oluşturduğu boşluk.
- ✓ Beton karılma ve yerleştirilmesi sırasında betonun içerisinde de oluşan hava boşlukları.
- ✓ Agrega tanelerinin yapısı itibarıyla oluşan boşluklar.

### 2.3. Klor İyon Geçirirliği

Klorür iyonları çeşitli yollarla beton içine girebilirler. Bunlar,  $\text{CaCl}_2$  içeren katkı maddeleri kullanılması, klorür içeriği yüksek olan agregaların kullanılması, deniz suyunun karma suyu olarak kullanılması ve klorür içeren mineral katkıların kullanılması

sayılabilir. Ayrıca içme suyunda (250 ppm) ve çimento bünyesinde klorür iyonu bulunmaktadır. Beton içine klorürler, suyla birlikte ilerleme, kapiler emme ve difüzyon yoluyla geçerler. Betonda meydana gelen ıslanma-kuruma olayı tüm bu süreçlerin gelişimini hızlandırır. Özellikle buz çözücü tuzlar, deniz suyu ya da yeraltı suları, tuz üreten veya işleyen tesisler en önemli klorür kaynaklarıdır. Tekrarlı olarak ıslanma kuruma etkisindeki deniz yapılarında deniz suyundaki klorür iyonları beton içine sızar, suyun betonu terk etmesi sonucunda klorür iyonları beton içinde kalır. Bu durumun tekrarlı olarak devam etmesi durumunda beton içindeki klorür yoğunluğu artış gösterir. Bu klorür yoğunluğu yüzeyden derinlere inildikçe azalan bir dağılım gösterir. Şekil 2.4’de bu durum gösterilmiştir. Betonun ve beton içindeki donatıların bu klorür iyonlarından etkilenmemesi için alınması gereken en önemli tedbir geçirimsizlik ve kalınlık yönünden yeterli olan beton tasarımının yapılmasıdır.



**Şekil 2.4.** Beton içerisine sonradan giren klorür iyonlarının yüzeyden derine doğru miktar değişim durumu (İlca 2008).

Betonda ki klorür tespiti için yapılan deney yöntemleri “ASTM C1152 betonda ve harçta asitte çözünür klorür” ve ASTM C 1218 “betonda ve harçta suda çözünür klorür” standartlarında belirtilmiştir. Betonda korozyona neden olmayacak klorür içeriğini saptamak oldukça zordur. Çünkü bu değer betonun, çimento dozajına, su/çimento oranına, çimento tipine, çevre koşullarına, kür koşullarına, karbonatlaşma

riskine, bağıl hava nemi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişir. Başka bir zorlukta betonun homojen olmayan yapısı ve maruz kaldığı koşulların değişkenlik göstermesinden dolayı klor konsantrasyonunun betonun her yerinde sabit olmamasıdır. Yapılan araştırmalarda betondaki gözenek suyunun 300-1200 mg/l değerini veya klorür iyonu miktarının 0,6–0,9 kg/m<sup>3</sup> aşması durumunda pasif tabakanın çözülme ihtimali olduğunu belirlemişlerdir. Bu tespitler pH'nın 12,5 den büyük olduğu geleneksel betonlar içindir. Betondaki kritik klorür muhtevası için tek değerden bahsetmek mümkün değildir. Genel olarak betonarme yapılar için çimento ağırlığının %0,4'ü önerilmeli beton yapılar için çimento ağırlığının %0,2'si sınır değer olarak kabul edilir (Demirci 2012).

İngiliz standardı BS 8110'a göre betondaki toplam klorür içeriği çimento ağırlığının %0,4'ü ile sınırlarken, Amerikan standardı ACI 318 klor etkinliğine açık (liman, köprü vb.) yapılarda %0,15, ön germeli beton yapılarda %0,06 olarak sınırlamıştır. En sıkı sınırlamalar ACI 222R-96 da yapılmaktadır. Çizelge 2.8'de ACI 222R-96 standardına göre çimento ağırlığına oranla asitte ve suda çözünen klorür miktarları verilmiştir. Ülkemizde kullanılan TS EN 206-1 standardında bulunan koşullarda Çizelge 2.9'da gösterilmektedir. Ayrıca TS EN 206-1 de Avrupa ve Amerika'da uygulanan kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıların donatıyı vereceği zarardan dolayı önerilmeli çelik donatı, çelik donatı ve diğer metal ihtiva eden betonlarda kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir (Ilıca 2008).

**Çizelge 2.8.** ACI 222R'e göre betonun klorür içeriğinin sınıflandırılması (çimento ağırlığına)

| Yapı türü ve bulunduğu ortam | Asitte çözünen klorür (%) | Suda çözünen klorür (%) |
|------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Önerilmeli beton             | 0,08                      | 0,06                    |
| Betonarme (ıslak ortamda)    | 0,10                      | 0,08                    |
| Betonarme (kuru ortamda)     | 0,20                      | 0,15                    |

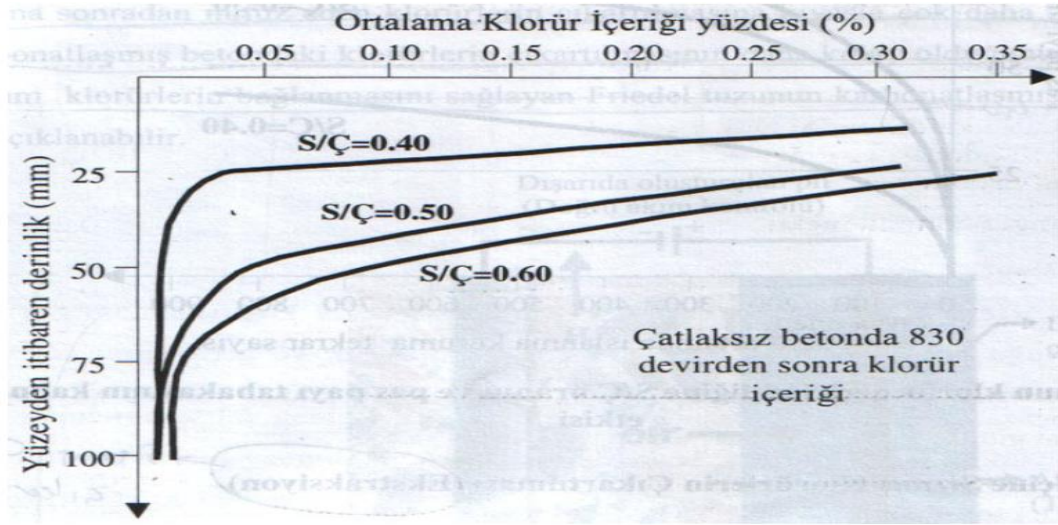
**Çizelge 2.9.** TS EN 206-1 standardına göre betonun klorür içeriğinin sınıflandırılması

| Kullanılan beton                                                                                        | Klorür içeriği sınıfı <sup>a</sup> | Çimento <sup>b</sup> kütlesine göre en fazla Cl <sup>-</sup> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Korozyona dayanıklı kaldırma (tutma) parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen | Cl 1,0                             | % ,0                                                         |
| Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden                                                          | Cl 0,20                            | %0,20                                                        |
|                                                                                                         | Cl 0,40                            | %0,40                                                        |
| Çelik öngerme donatısı ihtiva eden                                                                      | Cl 0,10                            | %0,10                                                        |
|                                                                                                         | Cl 0,20                            | %0,20                                                        |

<sup>a</sup> Özel kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli kurallara bağlıdır.

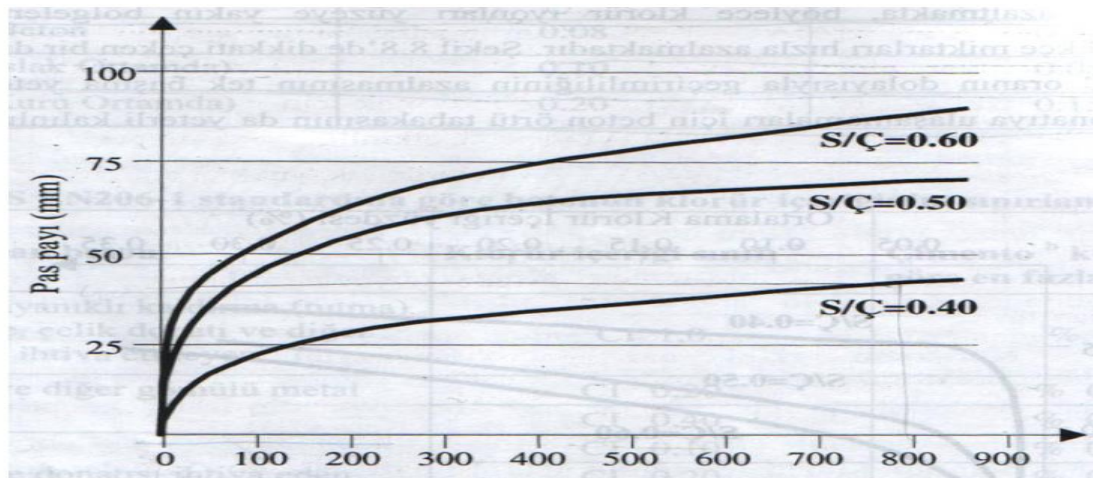
<sup>b</sup> mineral katkıların kullanıldığı ve katkının çimentoya dahil olarak kabul edildiği yerlerde, klorür muhtevası, klorür iyonlarının, çimento + dikkate alınan toplam katkı miktarlarına oranlamasıyla hesaplanır.

Betonda kullanılan agregaların toplam klorür içeriğinin kütlece %0,05'ini aşmaması gerekmektedir. Bu oran çimento türüne göre de azaltılmalıdır. Sülfata dayanıklı çimento türü tercih edilirse bu sınır %0,03'e çekilmelidir. Ön gerilmeli betonda kullanılan agregada ki değer %0,01 olarak verilmektedir. Betonun klorür geçirimsizliğinin tespiti yapılabilmesi için hızlandırılmış deney yöntemi ASTM C 1202 kullanılmaktadır. Deney sodyum klorür ve sodyum hidroksit içeren çözeltilere yerleştirilen beton disklerin belli bir zaman zarfında geçen akım miktarının (Coloumb) ölçülmesine göre belirlenir. Farklı türde betonların özelliklerinin tespiti için uygulanabilmektedir. Ancak bu yöntemin gerçek durumu yansıttığı söylenemez. Şekil 2.5'de 830 gün boyunca klorür tuzlarına maruz bırakılan beton numunelerinin S/Ç oranlarına göre değişimi gösterilmektedir. Derinlik etkisiyle de klorür içeriğinin nasıl değiştiği gösterilmiştir (Ilıca 2008).



Şekil 2.5. Betonun klorür geçirirliğine S/Ç oranının etkisi (İlca 2008)

Beton örtü kalınlığının ve S/Ç oranının betonda ki klorür geçirirliğine etkisi ise Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu araştırmada, beton içerisindeki farklı derinliklerde klor miktarının %0,2 değerine ulaşması için gereken klorüre maruz kalma süreleri (sayıları) belirlenmiştir. Şekilden de anlaşılabileceği üzere, tuzlara tekrarlı ıslanma-kuruma etkisiyle maruz kalacak betonların pas payı kalınlığının S/Ç oranı ile doğru orantılı olacak şekilde arttığı görülmektedir. Daha şiddetli etkiye maruz kalınan durumlarda ise pas payı kalınlığının daha da artırılması ve gerekirse betonun klorüre karşı izole edilerek korunması ACI 222R'de önerilmektedir (İlcalı 2008).

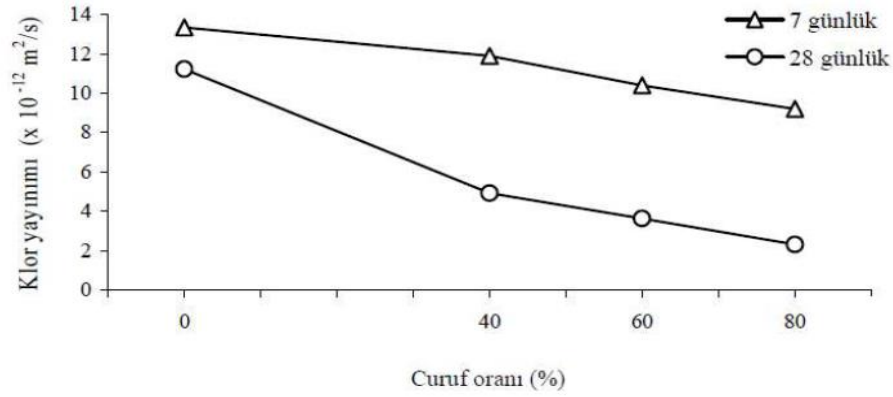


Şekil 2.6. Betonun klorür geçirirliğine S/Ç oranının ve pas payı tabakasının kalınlığının etkisi

Uçucu kül kullanılarak üretilen betonlarda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda klorür difüzyon katsayısının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca beton da kullanılan agregaların maksimum tane boyutu arttıkça, portland çimentolu betonlarda klorür difüzyon katsayısı artış göstermekte, uçucu kül kullanılan betonlarda ise bu katsayı neredeyse sabit kalmaktadır. Bunun nedeni olarak agrega yüzeyi ile çimento hamuru arasında ki geçiş bölgesinden kaynaklanmaktadır. Agregaya boyutuna göre değişim gösteren yüzey özellikleri uçucu külün kullanılması ile boşlukların daha iyi dolması ve uçucu külün pozolanik reaksiyon özellikleri ile ilgilidir (Ilıcalı 2008).

Puzolan eklenmiş harç karışımları üzerinde yapılan kimyasal analizler sonucunda puzolanların klor geçirimsizliğini azalttığı tespit edilmiştir. Betondaki boşluk miktarı betonun klor geçirimsizliğini etkiler. Geçirimsizliği düşürmek istiyorsak betonun boşluk oranı düşürmemiz gerekir. Boşluklu yapıyı azaltmak için beton harcına puzolanik kökenli katkıları ilave edilmelidir. Araştırmalar mukavemetten ödün vermeden, betonun kimyasal yapısına pozitif katkı sağlayacak kimyasal madde oranları ve puzolan incelikleri üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan araştırmalarda uygun puzolanlar beton karışımı içine eklenerek, çimento hidrasyon sonucu açığa çıkan kireçle reaksiyona girmiş ve kalsiyum silikat ortaya çıkmıştır. Kalsiyum silikat betondaki boşluklu yapıyı büyük oranda düşürmektedir. Puzolanik katkıları korozyona karşı kimyasal ve fiziksel direnci artırır. Yoğun ve geçirimsiz bir içyapı elde edebilmek için uygun dozajda puzolanik malzeme kullanılmalıdır (Türkoğlu 2010).

Hızlandırılmış klor yayılımı deney sonuçları Şekil 2.7’de verilen betonda klor yayılımını önemli ölçüde etkiler. Klor yayılımında elde edilen düşüşler betondaki cüruf içeriği ile ilgilidir (Şengül vd 2007).



**Şekil 2.7.** Cüruf- klor yayını içeriği

Cüruf kullanımı Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi klor yayınında önemli azalmalara neden olmaktadır. Bu durum 7 gün gibi erken bir yaştaki betonda bile kendini göstermektedir. 7 günlük beton incelendiğinde yüksek fırın cürufu %40 oranında portland çimentosu ile yer değiştirilmesi durumunda hızlandırılmış klor yayınında %14’lük düşüşe neden olur. %60 ve %80 oranında cüruf içeren betonlarda ise hızlandırılmış klor yayınında %22 ve %31’lik düşüşler görülmüştür (Şengül vd 2007).

Klor iyonunun geçirimsizliğindeki en önemli unsur betonun bileşimidir. Betonun klor iyon geçirimsizliğini azaltmak için uygun mineral katkıları, portland çimentosuyla belirli oranlarda yer değiştirilerek kullanılır. Kalsiyum hidroksit ile mineral katkıları tepkimeye girerek kalsiyum silikat hidratları oluştururlar. Puzolanik mineral katkıların başında sanayi atık maddesi olan yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gelmektedir. Puzolanik katkıları çimento miktarını azaltıp maliyeti düşürür, taze ve sertleşmiş haldeki betonun özelliklerini iyileştirir ve beton geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyerek avantaj sağlar. Puzolanik katkıları kullanılarak üretilen betonlar, normal portland çimentosuyla üretilen betonlara göre klor geçirimsizliği yönünden daha üstündür. Bu maddelerin katkı olarak kullanılması da çevre kirliliğini önleme konusunda önemli bir etkidir. Mineral katkıları kullanılarak üretilen betonlar normal portland çimento ile betonlara kıyasla klor geçirimsizliğine karşı daha fazla direnç göstermektedirler. Aynı

zamanda bu maddelerin beton katkısı olarak kullanılması çevre kirliliğini önlemede önemli etkiye sahiptir (Şengül 2011).

#### **2.4. Geleneksel Beton ve Kendiliğinden Yerleşen Beton İle İlgili Yapılan Çalışmalar**

Khayat *et al.* (1992) betonlara ilave edilen silis dumanının erken yaşlarda dayanımı artırdığını fakat uzun dönemde dayanım kazanma hızında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Silis dumanı katkılı betonların eğilme ve çekme dayanımlarının basınç dayanımına oranının katkısız betondakilere benzediğini belirtmiştir. Basınç dayanımı yüksek betonların çekme ve eğilme dayanımları da yüksektir. Silis dumanı miktarının artması ya da süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması, eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betondakilere göre daha küçük olduğunu söylemiştir.

Shannag (2000) yapmış olduğu deneysel çalışmada silis dumanı kullanarak yüksek dayanımlı beton elde etmiştir. Çimento ağırlığının belli oranlarda silis dumanı ile ikame edilerek elde edilen karışımlara yapılan 28 günlük basınç dayanım deneyi sonuçlarının 50-70 MPa civarında olduğunu tespit etmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı ile çimentonun yer değiştirme oranının %15 olduğu karışımların dayanım olarak daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemiştir. Yapmış olduğu çalışma sonucunda çimento miktarı arttıkça ve S/B oranı azaldıkça silis dumanının etkisinin de azaldığını belirtmiştir.

Hassan *et al.* (2000) yaptıkları deneysel çalışmalarda değişik oranlarda çimento ağırlığınca ikame edilen silis dumanı ve uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı betonları incelemişlerdir. Ürettikleri betonların basınç dayanımı, porozite, oksijen permeabilitesi, oksijen difüzyonu ve klor geçirimliliği deneylerini yapmışlardır. Çalışmaları sonucunda uzun vadede %10 silis dumanı ve %30 uçucu kül içeren numunelerin basınç mukavemetlerinin artış göstermesinde önemli özelliğe sahip olmamalarına rağmen geçirgenlik özelliklerine önemli derecede katkı sağladıklarını belirtmişlerdir.

Ataç (2001) yapmış olduğu çalışmada C tipi UK kullanarak elde ettiği betonun sertleşmiş beton özelliklerini incelemiştir. UK'nın ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında çimento ile yer değiştirerek betonlar üretmiştir. Yapmış olduğu bütün karışımlarda bağlayıcı miktarının  $300 \text{ kg/m}^3$  ve S/B oranı ise 0,55 olarak sabit tutulmuştur. 12 cm'lik bir çökme elde edebilmek için süper akışkanlaştırıcı kullanmıştır. Deney numuneleri kür havuzlarında, ıslak çuval ve poliüretan örtü altında, rutubetli bir odada olmak üzere üç farklı şekilde kür edilmiş ve numuneler 7, 28, 260 gün sonra basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuşlardır. Laboratuvar ortamında tutulan numunelerin uçucu kül oranı arttıkça 28 günlük basınç dayanımlarında azalma olduğu, 28 güne kadar suda kür edilen diğer numuneler ile 7 güne kadar nemli ortamda kür edilen numuneler için basınç mukavemetleri aynıdır. 260 günlük basınç mukavemetinde de uçucu kül ikame oranına bağlı olarak azalma gözlemlenmiştir.

Lachemi *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada farklı S/B (0,35-0,50) oranında,  $400 \text{ kg/m}^3$  sabit dozlu, çimento ile ikame edilen F sınıfı UK (%40-50-60) ve kimyasal katkı (SNF ve sentetik reçine tipi hava sürükleyici katkı) kullanılarak elde ettikleri KYB'ler üzerinde çökme- yayılma, terleme, hava içeriği, yerleşme zamanı, akış zamanı (V hunisi), segregasyon, basınç ve rötre değişimlerini incelemişlerdir. 0,45 S/Ç oranında %50 UK ile çimentonun yer değiştirmesi ile elde edilen betonun kontrol betonu ile aynı mukavemeti (35 MPa) göstermesine rağmen bu karışımın en küçük çökme değeri gösterdiğini, en düşük çökme yayılmasının 0,45 S/Ç oranında %60 UK ile çimentonun yer değiştirmesinde, en yüksek çökme yayılmasının 0,35 S/Ç oranında %40-60 UK ile çimentonun yer değiştirmesinde elde ettiklerini belirtmişlerdir. Deneylerinde, 26-48 MPa arasında basınç mukavemetlerinin değiştiğini söylemişlerdir. Yaptıkları çalışmada UK gibi ince malzeme kullanarak istenilen özelliklere sahip KYB üretilebileceğini, istenilen akış özelliğine sahip, ekonomik KYB'ler yüksek oranda F sınıfı UK'lerin kullanılabileceği sonucunu belirtmişlerdir.

Güneyisi vd (2002) yapmış oldukları çalışmada portland çimentosu (PÇ 42,5), portland kompoze çimentoları (PKÇ/A 42,5 R ve PKÇ/B 42,5), kompoze çimento (KZÇ/A 42,5) ve yüksek fırın cüruf çimentosu (CÇ 42,5) kullanarak iki farklı su/çimento oranına sahip

normal ve yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. 5 adet birinci grup, 5 adet de ikinci grup olmak üzere 10 farklı beton karışımı üretilmiş olup birinci grup numuneler normal dayanımlı olarak, ikinci grup numuneler ise yüksek dayanımlı betonlar olarak belirlenmiştir. Bunlardan birinci grubun su/çimento oranı 0,65 ve 300 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında, ikinci grubun ise su/çimento 0,45 ve 400 kg/m<sup>3</sup> çimento dozajında ve yukarıda bahsedilen çimentolar kullanılarak üretimi yapılmıştır. Üretilen betonların çökme değerlerini 17±2 cm çökme değeri olarak elde edebilmek için gereken miktarda süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanmışlardır. Üretilen betonların basınç dayanımları, klorür penetrasyon derinliği, hızlandırılmış klorür geçirimsliliği ve elektriksel direnç gibi durabilite özelliklerine bakılmıştır. Deneyler 28 ve 90 gün sonunda yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre katkılı çimentoların normal çimentolara göre 28 günlük basınç dayanımı aynı veya daha az iken 90 günlük basınç dayanımı daha fazla çıkmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda bu durum daha belirgin şekilde görülmüştür. Katkılı çimentoların klorür penetrasyon derinliği (PKÇ/A 42,5 R kodlu kompoze portland çimentosu hariç) her iki türde ki beton sınıfı numunelerinde portland çimentolu betonlara göre daha az olarak tespit edilmiştir. Hızlandırılmış klorür geçirimsliliği deneyinde ise her iki tür betonda da katkılı çimentoların portland çimentosuna göre daha az geçirimsliliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Katkılı çimentoların elektriksel dirençlerinin normal portland çimentosu ile üretilen betonlara göre daha fazla olduğu da yapılan deneyler sonucunda tespit etmişlerdir.

(Şengül vd 2003) yapmış oldukları çalışmada ince öğütülmüş uçucu kül ve ince öğütülmüş yüksek fırın cürufunun betonun basınç dayanımı ve klor geçirimsliliği etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada iki farklı seri de beton üretmişlerdir. Birinci seri de portland çimentosu F tipi uçucu kül ile ikame edilmiş, ikinci seri de ise yüksek fırın cürufu ile ikame edilmiştir. Deneyler bir yıllık numuneler üzerinde yapılmıştır. Uçucu kül içeren betonların Su/Bağlayıcı oranı 0,35 alınmış, çökme değeri 100±20 mm olarak tespit edilmiştir. Uçucu kül kullanılarak üretilen betonlardan %40 oranında uçucu kül içeren betonların kontrol betonu ile aynı basınç dayanımına sahip olduğu, bu oranın arttığı betonlarda ise basınç dayanımında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Hızlı klor geçirimsliliği – ASTM C 1202 standardına göre yapılan deneylerde ise %30

oranında uçucu kül kullanılan betonların klor geçirimsizliğinin önemli miktarda azaldığı görülmektedir. Uçucu kül miktarının %30'u geçtikten sonra ise klor geçirimsizliğinde önemli derece de azalma olmamaktadır. ASTM C 1202 standardında verilen sınır değerlere göre; uçucu kül içermeyen betonların klor geçirimsizliği fazla, %30 ve daha fazla uçucu kül içeren betonların ise “klor iyon geçirimsizliği” ihmal edilebilir sınırına yakındır. Yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 2.10'da verilmiştir. Yüksek fırın cürufu içeren betonların Su/Bağlayıcı oranı 0,40 alınmış, çökme değeri  $100 \pm 20$  mm olarak tespit edilmiştir. Yüksek fırın cürufu içeren numunelerde yapılan hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonucuna göre ise %80 cüruf içeren betonların klor geçirimsizliği en düşük geçirimsizliğe sahip beton olmuştur.

**Çizelge 2.10.** Bir yıllık numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımı ve hızlı klor geçirimsizliği deneyi sonuçları.

| Karışım                                             | NB    | UKB<br>10 | UKB<br>20 | UKB<br>30 | UKB<br>40 | UKB<br>50 | UKB<br>60 | UKB<br>70 |
|-----------------------------------------------------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Basınç<br>Dayanımı<br>(MPa)                         | 116,2 | 127,8     | 125,2     | 125,1     | 115,4     | 107,8     | 94,6      | 80,0      |
| Hızlı Klor<br>Geçirimsizliği<br>Deneyi<br>(Coulomb) | 1536  | 447       | 345       | 135       | 140       | 148       | 159       | 116       |

Dinçer vd (2004) yaptığı çalışmada çimento miktarını ağırlıkça %0, 5, 10, 20, 30, 40 oranlarında uçucu kül ikame edilerek beton karışımları üretmiştir. Üretilen betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Yaptığı deneysel çalışma sonucunda betonun mekanik özelliklerine etkisinin %20 uçucu kül ikamesine kadar çok iyi olduğunu, şahit betonundan daha iyi davranış gösterdiğini ancak %20 oranından daha fazla oranda uçucu kül kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımlarında düşüş olduğunu belirtmiştir. Uçucu kül oranı %20'ye kadar olan betonların basınç dayanımlarının 90

güne kadar olan şahit beton dayanımları kadar, 180 günden sonra ise şahit beton dayanımından fazla olduğunu gözlemlemiştir. %30 oranında uçucu kül kullanılarak üretilen betonların ise şahit betona göre %10, 15 düşüş gösterdiğini söylemiştir.

Türkel vd (2004) yaptıkları deneysel çalışmada silis dumanı ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak ürettikleri betonlarda kendiliğinden yerleşebilirlik ve basınç dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çimento ağırlığının %7,5'i oranında silis dumanı ile yer değiştirmesi, iki farklı su-bağlayıcı oranı, iki farklı tipte ve oranda akışkanlaştırıcı kullanılarak tasarladıkları karışımlarında yerleşebilme açısından taze beton deneyleri yapmışlardır. Sertleşmiş KYB numuneleri üzerinde 2, 7, 28 günlük basınç deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalar neticesinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ve silis dumanı kullanılarak düşük toz miktarlarında dahi KYB üretiminin mümkün olabileceğini söylemişlerdir. Silis dumanı ve kimyasal katkının hem kendiliğinden yerleşebilme hem de basınç dayanımı özelliklerini olumlu yönde etkilediklerini belirtmişlerdir. Taze haldeki KYB'lerin özelliklerinin sağlanmadığı sıkıştırma işlemi uygulanarak üretilen betonlar ile dereceli olarak daha yüksek katkı dozajına sahip KYB'ler ile basınç dayanımı yönünden yapılan karşılaştırmalar sonucunda farklılıklar gözlemlemiştir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda akışkanlaştırıcı katkının uygun dozajda kullanılması durumunda sıkıştırma işleminin ortadan kaldırılabileceğini belirtmişlerdir.

Şahmaran vd (2004) yaptıkları çalışmada yüksek hacimli uçucu kül kullanılarak KYB üretimi yapılmıştır. 7. ve 28. günde basınç dayanımları, 28. günde çekme dayanımları kontrol edilmiştir. Çizelge 2.11'de verilen uçucu kül oranları buna bağlı olarak elde edilen basınç dayanımı ve çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde uçucu kül miktarının %40'dan fazla olması halinde iki dayanımında da azalma olmaktadır. Üretilen KYB'lerin dayanımlarında ki azalma 7. günde daha fazla 28. günde daha az olmaktadır. 28. günde bulunan çekme dayanımlarında ki sonuçlarda uçucu kül kullanılarak üretilen betonların dayanımlarında azalma olduğunu göstermiştir.

**Çizelge 2.11.** UK katkılı KYB'nin basınç ve çekme dayanım sonuçları

| Karışım No | Su/(UK+Ç) | UK/(Ç+UK)<br>% | Basınç Dayanımı (MPa) |      | Çekme Dayanımı (MPa) |
|------------|-----------|----------------|-----------------------|------|----------------------|
|            |           |                | 7 G                   | 28 G | 28 G                 |
| 1          | 0,37      | 0              | 38,3                  | 46,6 | 4,4                  |
| 2          | 0,35      | 40             | 32,7                  | 44,9 | 4,1                  |
| 3          | 0,34      | 50             | 28,3                  | 40,6 | 3,4                  |
| 4          | 0,32      | 60             | 24,8                  | 36,8 | 2,8                  |
| 5          | 0,31      | 70             | 20,7                  | 30,5 | 2,3                  |

Özcan (2005) yapmış olduğu çalışmada değişik oranlarda silis dumanı kullanılarak ürettiği harç ve beton özelliklerine olan etkilerini incelemiştir. Ürettiği beton numuneler için çimento dozajları 350, 400 ve 450 kg/m<sup>3</sup>'tür. S/Ç oranı 0,3, 0,4, 0,5 ve 0,6 olan farklı tipte karışımlar olup çimento miktarının ağırlıkça %10, 15 ve 20 silis dumanı ile ikame ederek betonlar üretmiştir. Beton numuneleri üzerinde çökme yayılma deneyi hızlandırılmış ılık su deneyi, basınç dayanımı, kür şartları değişimi ve ultrasonik ses dalgası ölçümleri yapmıştır. Harç numuneler için çimento/kum oranı 2,75 olan ve S/Ç oranı 0,25, 0,30, 0,40, 0,50 ve 0,60 olan farklı tip karışım hazırlanmış olup çimento miktarının ağırlıkça %10, 15, 20 ve 40 ikame edilmesiyle numuneler üretilmiştir. Ayrıca harç numuneleri için kuru ve su kürü ayrı olarak uygulanmıştır. Harç numuneleri üzerinde yayılma tablası deneyi, eğilme/çekme dayanımı, basınç dayanımı, aşınma dayanımı, rötre deneyi, boşluk oranı, su emme oranı, kapiler su emme deneyi, karbonatlaşma deneyi yapmıştır. Çalışmasının sonucunda %10, 15 ve 20 silis dumanı ilavesi ile harç numunelerin basınç, eğilme ve aşınma dayanımlarında artış olduğunu, boşluk oranı ve kapiler su emme dayanımında kontrol numunesine göre önemli oranlarda düşüş olduğunu tespit etmiştir. Harç karışımlara %40 oranında silis dumanı ilave edilen numunelerin ise yukarıda belirtilen özelliklerinde daha az farklılık olduğunu gözlemlemiştir. Beton karışımlarında ise silis dumanı katılan numuneleri kontrol numunelerine göre basınç mukavemetinde %50'ye varan artış olduğunu belirtmiştir. Silis dumanı ile üretilen harç ve betonların basınç mukavemetlerinin, kuru kür şartlarında kontrol betonlarına göre daha çok etkilendiğini belirtmiştir.

Türk vd (2006) yaptıkları çalışmada farklı oranlarda uçucu kül kullanarak hazırladıkları KYB'nin dayanım özelliklerini incelemişlerdir. Beton numuneler %25, %30, %35, %40 oranlarında uçucu külün CEM I 42,5 çimentosunun yerine ikame edilerek, S/Ç oranı 0,38 olarak alınarak hazırlanmıştır. Numuneler  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  suda küre maruz bırakılmışlardır. 3., 7., 14. ve 28. günde numunelerin basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve rölatif ultra ses hızı incelenmiştir. Basınç dayanımları 3. ve 28. Günde %25 uçucu kül içeren betonlar da daha fazla olduğu görülmüştür. 7. ve 14. günde ise %30 uçucu kül kullanılan betonların dayanımının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. 28. günlük basınç dayanımının betonun ileri ki dönemlerde göstereceği dayanım özelliğini daha fazla yansıttığı göz önüne alındığında %25 uçucu kül kullanılmasının KYB'nin basınç dayanımını arttırdığı sonucuna varmışlardır. Yarmada çekme dayanımları açısından yapılan incelemelerde 28. günde %30 oranında uçucu kül kullanılarak üretilen KYB'nin çekme mukavemetine önemli katkı sağlayacağı tespit edilmiştir. Rölatif ultra ses hızı deney sonuçları incelendiğinde de %30 uçucu kül içeren KYB'nin daha yüksek ultra ses hızına sahip olduğu bulunmuştur. Yapılan incelemeler neticesinde uçucu külün maliyete ve hidrasyona olumlu etkisi göz önüne alındığında basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ultra ses hızı bakımından %30 oranında uçucu kül kullanılmasının daha iyi olacağı bu çalışmada önerilmiştir.

Şimşek vd (2006) kontrol betonu dışında hazırladıkları betonlarda %50 çimento oranını sabit tutup diğer %50'lik dilimde ise belli oranlarda puzolan katkı maddelerini birlikte kullanarak betonun basınçlı su geçirimsizliğine etkilerini gözlemlemişlerdir. Yapılan deneyler neticesinde elde edilen su işleme derinliği incelendiğinde silis dumanının geçirimsizliğe ters oranda bir etkisi olduğu, uçucu külün ise geçirimsizliği silis dumanına göre daha azaltıcı bir etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Tüm seriler dikkate alınarak cüruf, uçucu kül ve kalker fillerinin su işleme derinliğini azaltıcı bir etkilerinin olduğundan söz etmişlerdir.

Dinakar vd (2008) yaptıkları çalışmada yüksek oranda uçucu kül katkısı içeren KYB'lerin durabilite özelliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma kapsamında %0, 10, 30, 50, 70 ve 85 oranında uçucu kül ilave edilmiş farklı dayanımlardaki 8 KYB

betonu ile aynı dayanım oranlarına sahip 5 farklı karışımdaki GB karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmaları kapsamında porozite asit etkisi ve klor geçirimliliği gibi durabilite özelliklerini ölçmüşlerdir buldukları sonuçlar doğrultusunda uçucu kül katkılı KYB'nin klor geçirimliliği ve asit saldırısı deneylerinde GB'ye göre daha iyi performans sergilediklerini söylemişlerdir. Ayrıca uçucu kül oranı arttıkça klor geçirimliliği direncinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları bu çalışmada beton dayanımı arttıkça betonun klor iyon geçirgenliğinin de azaldığını belirtmişlerdir. Yine çalışmaları doğrultusunda üretilen uçucu kül katkılı KYB'ler de GB'ler ile karşılaştırıldıklarında geçirgen boşluk yüzdesi ve su emme miktarını daha yüksek bulmuşlardır.

Durmuş (2008)'un mineral katkılardan uçucu kül, silis dumanı ve kimyasal katkı maddeleri kullanarak üretilen C20 ve C30 betonların basınç ve su işleme derinliği üzerine etkilerini incelemiştir. Karışımlarını TS 802'ye göre hazırlanmış ve S/Ç oranı 0.50 olarak alınmış betonların 28 ve 90 gün sonra sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda karışıma %10 oranında silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek üretilen betonların 28. ve 90. günlük sonuçları şöyle belirtilmiştir. Geçirgenlik değerleri bakımından mineral katkılı betonların daha az miktarda geçirgen oldukları ve zamana bağlı olarak da azaldığı gözlemlenmiştir. Betonların basınç dayanımı açısından da mineral katkılı olanların daha fazla dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Kısacası mineral katkıların betonların hem geçirimlilik özelliğini hem de dayanım özelliğini arttırdığı yapılan bu çalışma neticesinde söylenebilir.

Yiğiter (2008) tarafından yapılan bir deneysel çalışmada, hızlı klor geçirimliliği deneyleri neticesinde, yüksek performanslı betonların geçirimlilik değerlerinin normal betonlara kıyasla %62-%63 oranında daha az bulmuştur. Mineral katkı kullanımının betonun boşluk miktarını azalttığı gibi, aynı zamanda betonun elektriksel direncini de artırdığı hızlı klor geçirimliliği düşük olmasından anlaşıldığını söylemiştir. Ayrıca herhangi bir kür işlemi uygulanmayan numuneler ile buhar kürü uygulanmış numuneler, standart kür uygulanmış kürlere kıyasla daha boşluklu yapıya sahip olduklarından klorür etkisine daha çabuk maruz kaldığını ifade etmiştir.

Doğan vd (2009) CEM I 42,5 normal portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı kullanılarak farklı Su/Bağlayıcı özelliklerine sahip üretilen betonların hava kürü ve su kürü uygulayarak basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimliliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Deneyler 90. günde yapılmıştır. Kontrol betonuna göre mineral katkı kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı ve hızlı klorür geçirimliliği deneyleri her iki kür koşulunda da daha iyi sonuçlar vermiştir. Hava kürü uygulanan silis dumanı katkılı betonların hızlı klor geçirimlilikleri suda saklanan numunelere göre 1,04 - 3,4 kat daha yükseldiği ve basınç dayanımlarının da %2,4-%13,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde uçucu kül kullanılarak üretilen betonlarında hava kürü uygulananların su kürü uygulananlara göre hızlı klor geçirimliliklerinin 1,5-15 kat yükseldiği ve basınç dayanımlarının da %2,0-%14,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Demir vd (2009) yaptıkları deneysel çalışmada uçucu kül ve silis dumanı katkılarının sertleşmiş beton özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Ürettikleri betonlarda kullanılan çimentonun ağırlıkça %5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ikame ederek karışım oluşturmuşlardır. 7. ve 28. Günlerdeki dayanım özelliklerini katkısız kontrol betonu ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları karşılaştırma sonucunda uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonların kontrol betonuna göre daha iyi sonuçlar verdiğini söylemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda uçucu kül katkısı kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımlarının 28. günde 7. güne nazaran dayanımda artış olduğunu söylemişlerdir. Ancak silis dumanı kullanılarak üretilen betonların silis dumanı yüzdesi arttıkça basınç dayanımının da arttığı belirtmişlerdir. Betonun basınç dayanım özelliğine silis dumanının olumlu etkisi uçucu küle göre daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

İlıcılı vd (2011) CEM I 42,5 R (portland çimentosu), SDÇ 32,5 N (sülfata dayanıklı çimento), CEM III 32,5 N (yüksek fırın cürufu), CEM III 42,5 N (yüksek fırın cürufu) ve %10 CEM I 42,5 R çimentosu kesilip yerine %25 uçucu kül ikame edilerek üretilen C25/30, C30/37, C35/45 ve C40/50 dayanım sınıflarında ve 150±10 mm çökme değerine sahip betonların hızlı klor geçirimliliği, kılcal su emme ve ağırlıkça su emme özellikleri incelemişlerdir. Hızlı klor geçirimliliği deneyi ASTM C 1202-05 standardına göre kılcal ve ağırlıkça su emme deneyleri ise TS 4045 (1984) standardına uygun olarak

yapılmıştır. Hızlı klor geçirimsizlik deneyi sonucunda yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonların tüm beton sınıflarında daha az geçirimsizliğe sahip olduğu bulunmuştur. Saf portland çimento kullanılarak üretilen beton sınıfları ile yapılan kıyaslamalarda uçucu kül kullanılarak üretilen betonların C25/30 dayanım sınıfı için belirgin bir etkisi gözlenmemişken, diğer dayanım sınıflarında uçucu kül kullanılan betonların klor geçirimsizliği cürufu çimento kullanılarak üretilen betonların geçirimsizlik özelliğine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca beton dayanım sınıfında ki artışın da geçirimsizliği azalttığı bu çalışmada belirtilmiştir. Kılcal su emme ve ağırlıkça su emme deneyleri sonucunda cürufu çimentolar hızlı klor geçirimsizliğinde gösterdiği performansı göstermemişlerdir. Bu iki deney de portland çimentosu kullanılarak üretilen betonlar daha olumlu sonuçlar vermiştir. Yapılan tüm deneylerde beton dayanım sınıfı arttıkça beton özelliklerinin de daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Türkel vd (2011) deniz kumu ve farklı türde çimentolar kullanarak yapılan harç ile ilgili çalışmalarında, beş farklı çimento türü CEM I 42,5 R, CEM II/A-M(P-W) 42,5 R, CEM II/B-M(P-W) 32,5 R, CEM II/A-W 52,5 N, CEM III/A 42,5 N ve iki farklı S/Ç 0,485 ve 0,7 olarak belirlemişlerdir. Üretilen harçların yayılma çapları Çizelge 2.12’de verilen değerlerde de görüldüğü gibi S/Ç oranının artması yayılma çaplarının da artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Genelde aynı S/Ç oranına sahip durumlarda çimento inceliğine göre yayılma çapının düşmesi beklenirken burada inişli-çıkışlı bir durum meydana gelmiştir. Bu durumda çimentoların içerisinde yer alan mineral katkı tipinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Çimento harcı numunelerinin basınç dayanımı ASTM C 349 standardına uygun olarak yapılmış ve bulunan değerler Çizelge 2.13’de verilmiştir. Harçların 28. ve 350. günde ölçülen dayanımlarından da görülebileceği gibi çimentoların dayanım sınıfının mekanik özellikler üzerinde önemli bir etken olduğunu söylemişlerdir. Harçların ASTM C 1202 standardına göre belirlenen sınır değerler dikkate alınarak, yaş ve kür koşulları da göz önünde bulundurularak ölçülen hızlı klor geçirimsizliği değerleri Çizelge 2.14’de verilmiştir. Çizelge 2.14’de verilen değerlerden de anlaşılacağı üzere klor geçirimsizliğin S/Ç oranının düşük olduğu harçlarda daha az olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra içerisinde yüksek sayılabilecek oranlarda mineral katkı (%30 tras, kalker, uçucu kül, %37 yüksek fırın cürufu) bulunması ve

inceliğinin de yüksek olduğu çimentolar ile üretilen harçların S/Ç oranının her iki durumunda da daha az klor geçirimsiliğine sahip olduğunu söylemişlerdir.

Puzolan madde kullanılması klor geçirimsiliğini büyük oranda azalttığı yapılan diğer çalışmalar ile de belirtilmiştir (Şengül vd 2003).

Yapılan diğer çalışmalardan da birkaç örnek verecek olursak; Bader S/Ç oranındaki azalmanın, Thomas ve Matthews uçucu kül kullanımının, Yiğiter vd. cüruflu çimento kullanılması ile klor geçirimsiliğinin, portland çimento kullanılan karışımlara göre daha az olduğu neticesine ulaşmışlardır (Bader 2003; Thomas vd 2004; Yiğiter vd 2007).

**Çizelge 2.12.** Örneklerin ortalama yayılma çapları

|                                  | S/Ç<br>oranı | Çimento Tipi    |                                |                                 |                       |                        |
|----------------------------------|--------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------|
|                                  |              | CEM I<br>42,5 R | CEM II/A-<br>M (P-W)<br>42,5 R | CEM II/ B-<br>M (P-W)<br>32,5 R | CEM II/A-<br>W 52,5 N | CEM<br>III/A<br>42,5 N |
| Ortalama yayılma<br>çapları (mm) | 0,485        | 113             | 108                            | 108                             | 108                   | 112                    |
|                                  | 0,7          | 180             | 177                            | 170                             | 175                   | 178                    |

**Çizelge 2.13.** Örneklerin basınç dayanım değerleri (MPa)

| Su/çim. = 0,485 |                   | Çimento Tipi    |                                |                                 |                       |                        |
|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Zaman<br>(gün)  | Bekleme<br>ortamı | CEM I<br>42,5 R | CEM II/A-<br>M (P-W)<br>42,5 R | CEM II/ B-<br>M (P-W)<br>32,5 R | CEM II/A-<br>W 52,5 N | CEM<br>III/A 42,5<br>N |
| 28              | Su                | 58              | 57                             | 46                              | 60                    | 50                     |
| 350             | Su                | 67              | 66                             | 59                              | 69                    | 62                     |
| 350             | Deniz suyu        | 54              | 55                             | 49                              | 59                    | 53                     |
| Su/çim. = 0,7   |                   |                 |                                |                                 |                       |                        |
| 28              | Su                | 32              | 33                             | 23                              | 36                    | 33                     |
| 350             | Su                | 41              | 45                             | 34                              | 44                    | 41                     |
| 350             | Deniz suyu        | 32              | 34                             | 29                              | 36                    | 33                     |

**Çizelge 2.14. Örneklerin klor geçirimlilik değerleri (Coloumb)**

| Değişkenler |               | Çimento tipine göre geçen yük miktarı (Coloumb) |                 |                                |                             |                       |                     | ASTM<br>C 1202<br>kriterleri<br>(Coloumb) |
|-------------|---------------|-------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| Zaman       | Koşullar      | S/Ç                                             | CEM I<br>42,5 R | CEM II/A-<br>M (P-W)<br>42,5 R | CEM II/ B-M<br>(P-W) 32,5 R | CEM II/A-<br>W 52,5 N | CEM III/A<br>42,5 N |                                           |
| 28          | Su            | 0,485                                           | 7303            | 5909                           | 3943                        | 5883                  | 2844                | >4000 (Yüksek)<br>2000-4000<br>(Orta)     |
|             |               | 0,7                                             | 10197           | 7516                           | 2515                        | 6841                  | 2334                |                                           |
| 350         | Su            | 0,485                                           | 2907            | 1040                           | 358                         | 1618                  | 878                 | 1000-2000<br>(Düşük)<br>100-1000          |
|             |               | 0,7                                             | 5725            | 2264                           | 616                         | 3380                  | 723                 |                                           |
| 350         | Deniz<br>suyu | 0,485                                           | 2993            | 2420                           | 688                         | 2090                  | 1013                | (Çok Düşük)<br><100 (İhmal<br>edilebilir) |
|             |               | 0,7                                             | 5826            | 4891                           | 783                         | 4310                  | 1268                |                                           |

Geçten vd (2013) CEM I 42,5 portland çimentosu, pomza, normal agregası ( $D_{max}$ :16 mm) kullanarak iki farklı beton üretimi yapmışlardır. Üretilen betonları günde 1, 2, ve 3 kez sulayarak, hiç kür etmeden dış ortam etkisine maruz bırakarak ve devamlı kür havuzunda bekleterek kür işlemine tabi tutmuşlardır. Sonra kür koşullarının basınç dayanımı ve kılcal geçirimlilik üzerine etkilerini araştırmışlardır. Kılcal geçirimlilik deneyi sonucunda pomza agregalı betonların kılcal geçirimlilik katsayılarının normal agregalı betonlara göre daha düşük değerlere sahip olduğunu bulunmuştur. Her iki tür betonda kür şartları iyileştikçe geçirimliliklerinin azaldığı da tespit edilmiştir. Betonda ki hidratasyonun devamlılığı için uygulanan su kürünün basınç dayanımından ziyade geçirimliliği daha çok etkilediği belirtilmiştir. Basınç dayanımları ise normal agregalı betonlarda daha fazla çıkmıştır. Fakat iki tür betonda da kür havuzunda bekletilen numunelerin diğer numunelere göre daha yüksek dayanıma sahip olması kürün beton için ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Ayrıca normal betonların kür süresi ve sulama sayısının, pomzalı betona göre daha fazla olması gerekliliği de bu deneyler neticesinde belirtilmiştir.

Özalp vd (2015) farklı kür koşulları altında betonun bazı özelliklerini araştırmışlardır. Normal, yüksek ve ultra yüksek dayanıma sahip betonları su kürü, buhar kürü ve yalıtılmış ortamda yüksek sıcaklık kürü olmak üzere 3 farklı kür koşulunda tutmuşlardır. Üretilen betonların basınç dayanımı, klor iyonu geçirimliliği ve kılcal su

emme değerleri belirlenmiştir. Üretilen numunelere 3 farklı kür uygulaması yapmışlardır. Bunlar;  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  standart su kürü,  $90^{\circ}\text{C}$  buhar kürü ve sonrasında su kürü, bir gün süreyle yalıtılarak  $150^{\circ}\text{C}$ 'de etüv kürü ve su kürü ortamında bekletilmişlerdir. 7. günde yapılan basınç dayanımı sonuçlarına göre normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonların buhar kürü ve etüv küründe dayanımlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise etüv kürü uygulanan numunelerin yüksek dayanıma sahip oldukları bulunmuştur. Normal betonların dayanımının düşük çıkması sıcaklıkla birlikte oluşan C-S-H jellerinin daha boşluklu yapıda olması ile ilişkilendirilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonların yüksek çıkmasının nedeni ise kullanılan silis dumanının belirli sıcaklık değerinin üzerinde daha kararlı bir içyapı da olması olarak belirtmişlerdir. 28. günde yapılan hızlı klor iyon geçirimliliği deneyin de ise yine normal ve yüksek dayanımlı betonların su kürü uygulanmış numunelerinin geçirimliliğinin diğer kür koşullarda ki numunelere göre daha az olduğu bulunmuştur. Dayanım arttıkça geçirimsizlik özelliği de artmıştır. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise etüv kürü yapılmış numunelerin geçirimliliği 10 coulomb'a kadar düştüğü belirlenmiştir. Kılcal su emme özellikleri de incelendiği zaman normal ve yüksek dayanımlı betonların su küründe en iyi sonucu verdiği bulunmuştur. Ultra yüksek dayanımlı betonların ise buhar küründe daha düşük su emme değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan araştırma sonucunda normal ve yüksek dayanımlı betonların ısıtılma işlem görmesiyle hızlı klor iyon geçirimliliği ve kılcal su emme miktarlarında artış olduğu tespit edilmiştir. Ultra yüksek dayanımlı betonlarda ise buhar kürü uygulamasının hızlı klor iyon geçirgenliği ve kılcal su emme değerlerini önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada C20/25, C35/45 dayanım sınıflarında geleneksel betonlar ve mineral katkı olarak silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak KYB'ler üretilmiştir. SD ağırlıkça %5, %10, %15 ve UK %15, %30, %45 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirilerek kullanılmıştır. Üretilen bu betonların basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve hızlı klor iyon geçirimsizliği ölçümleri yapılmıştır.

Agrega, su, kimyasal katkı, portland çimentosu, silis dumanı, uçucu kül farklı oranlarda kullanılarak geleneksel beton ve KYB karışım değerleri elde edilmiştir. Geleneksel betonda ve KYB kontrol grubu betonda mineral katkı kullanılmamıştır. KYB'nin diğer gruplarında ise belirlenen oranlarda mineral katkıların ağırlıkça çimento ile ikame edilmesiyle karışımlar elde edilmiştir. Üretilen taze betonlar üzerinde birim hacim ağırlığı, beton slump (çökme) deneyi, çökme-yayılma deneyi, L-kutusu deneyi, U-kutusu deneyi, V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonunda üretilen betonlar kalıplara yerleştirilmiştir.

Dokuz farklı beton serisi üretimi yapılmıştır. Üretilen betonların iki grubu geleneksel beton, bir grubu kontrol betonu, diğerleri ise farklı oranlarda mineral katkı içeren kendiliğinden yerleşen betonlardır.

Üretilen betonlardan her bir seri için 6 adet küp, 6 adet prizma ve 4 adet silindir numuneler üretilmiştir. Numuneler her bir serinin beton sınıfı ve kullanılan mineral katkı oranına göre adlandırılmıştır. Su kürü ile deneylerin yapılacağı zamana kadar kür uygulaması yapılmıştır. Küp numuneleri üzerinde basınç dayanımı deneyi, prizma numuneler üzerinde eğilmede çekme dayanımı deneyi ve silindir numunelerde ise deneyde belirtilen çap ve yükseklikte kesilerek hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları kendi içerisinde incelenmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Mineral katkıların eklenmesi sonucunda KYB'nin taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde değişimler görülmüş, basınç ve eğilmede çekme

dayanımlarında farklılıklar görülmüş, görülen farklılıklar da hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyleri sonuçları ile de desteklenmeye çalışılmıştır.

Çalışma için yapılan deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzeme ve deney aletleri aşağıda açıklanmıştır.

### **3.1. Materyal**

Bu bölümde üretilen betonlarda kullanılan agrega, su, süper akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri, çimento, uçucu kül, silis dumanı ile deneylerde kullanılan alet ve cihazların genel özellikleri açıklanmaktadır.

#### **3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler**

##### **3.1.1.a. Çimento**

EFNARC (2005)'a göre KYB'de çimento dozajı belirlenmesi için önemli etken istenilen dayanım sınıfıdır. Pozolanik katkı maddelerinin kullanılması halinde daha düşük dozajda çimento kullanılmasının yeterli olacağı yapılan araştırmalarda belirtilmiştir. Dayanım ve dayanıklılık açısından da pozolanik malzemenin ağırlıkça çimentonun yerine kullanılmasının belirli oranlara kadar olumlu etki ettiği erken yaşlarda belirgin olmasa da ilerleyen yaşlarda dayanım ve dayanıklılığa katkısı daha belirgin bir hal almıştır. KYB'ler de kullanılacak çimentolarda  $C_3A$  oranının %10'dan fazla olmaması önerilmektedir.

Bu çalışmada TS EN 197-1 standartlarına uygun, Aşkale Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42,5 R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun

kimyasal analizi Çizelge 3.1’de fiziksel ve mekanik özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** CEM I 42.5 R çimentonun kimyasal analizi

| Kimyasal Analizler (%)                                        |        | TS EN 197-1: 2012 Standart Limit |
|---------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>                                              | 18,10  |                                  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                | 4,48   |                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                | 3,09   |                                  |
| CaO                                                           | 63,65  |                                  |
| MgO                                                           | 2,50   |                                  |
| SO <sub>3</sub>                                               | 2,84   | Max. %4                          |
| Kızdırma Kaybı                                                | 3,90   | Max. %5                          |
| Na <sub>2</sub> O                                             | 0,21   |                                  |
| K <sub>2</sub> O                                              | 0,62   |                                  |
| (Na <sub>2</sub> O); Na <sub>2</sub> O+0,658*K <sub>2</sub> O | 0,62   |                                  |
| Cl                                                            | 0,015  | Max. %0,1                        |
| Ölçülemeyen                                                   | 0,52   |                                  |
| Toplam                                                        | 100,00 |                                  |
| CaO ( Serbest Kireç)                                          | 0,44   |                                  |
| Çözünmeyen Kalıntı                                            | 0,55   | Max. %5                          |

**Çizelge 3.2.** CEM I 42.5 R çimentonun fiziksel ve mekanik analizi

| Fiziksel ve Mekanik Testler        |                | TS EN 197-1: 2012        |
|------------------------------------|----------------|--------------------------|
| İncelik 45 µm elek üstü (%)        | 7,15           |                          |
| Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,12           |                          |
| Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 3698           |                          |
| Priz Başı (Saat – Dakika)          | 2 sa. – 31 dk. | Min. 60 dk.              |
| Priz Sonu (Saat – Dakika)          | 3 sa. – 11 dk. |                          |
| Hacim Genleşmesi (mm)              | 1,0            | Max. 10 mm               |
| Basınç Dayanımı 2 Gün (MPa)        | 27,90          | Min. 20 MPa              |
| Basınç Dayanımı 28 Gün (MPa)       | 58,00          | Min. 42,5- Max. 62,5 MPa |
| Su İhtiyacı (%)                    | 29,50          |                          |

### 3.1.1.b. Agrega

Bu çalışmada Erzurum ili sınırları içerisinde Aşkale mevkiinden temin edilen doğal kum ve çakıl kullanılmıştır. Kullanılan agregada dere malzemesi olup maksimum agregada çapı KYB için 16mm, geleneksel beton için 25 mm'dir. Agregada olarak KYB'de 0-2, 2-5, 5-12, 12-16, geleneksel betonda ise 0-5, 5-12, 12-19, 19-25 çaplı agregalar kullanılmıştır. Karışım hesaplarında agregaların kuru yüzey özgül ağırlığı  $2,66 \text{ gr/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır.

### 3.1.1.c. Karışım suyu

İçilebilir nitelikteki suyun beton üretiminde kullanımının uygun olduğu kabul edildiğinden, bu çalışmada Atatürk Üniversitesi içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmıştır.

### 3.1.1.d. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı

Bu çalışmada kimyasal katkı olarak Sabit Yapı A.Ş'den CHRYSO tarafından üretilen TS EN 934-2 ve ASTM C 494 standartlarına uygun polikarboksilat esaslı klor içermeyen yüksek oranda su azaltıcı özelliğe sahip yeni nesil süper akışkanlaştırıcı Fluid HP 1106 katkı maddesi kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı katkı geleneksel betonlar için toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1,20, KYB'ler de ise toplam bağlayıcı miktarının %1,91'i kadar katılmıştır. Kimyasal katkının üretici firma tarafından beyan edilen teknik özellikleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Chryso fluid hp 1106'nın teknik özellikleri

|                  |                                 |
|------------------|---------------------------------|
| Görünüm          | Sıvı                            |
| Yoğunluk         | 1,065 ± 0,02 gr/cm <sup>3</sup> |
| Renk             | Açık kahverengi                 |
| pH               | 6,00±1                          |
| Katı madde       | 32,00±%5                        |
| Klorür içeriği % | < 0,1                           |
| Alkali içeriği % | < 6                             |

**3.1.1.e. Uçucu kül**

Termik santraller de yanan kömürün açığa çıkardığı ince partiküller baca çekişi ile yukarıya doğru çıkarak elektrofiller de toplanır. Bu küller baca gazları ile sürüklenmektedir. Daha sonra küllerin hava ile teması etmesiyle oluşan ani soğuma neticesinde bu küller puzolanik özellik kazanır ve uçucu kül dediğimiz malzemeler meydana gelir. Uçucu kül taneleri genelde küresel şekildedir. Tane çapları 1 ile 150 µm arasında değişiklik gösterir (Şengül vd 2007).

Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan uçucu kül Ares Çimento tarafından Kütahya ili, Tavşanlı ilçesinde bulunan Seyit Ömer Termik Santralinden temin edilen TS EN 197-1, ASTM C 618 ve TS 639 standartlarındaki koşullara uygun F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Kullanılan uçucu külün kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.4'de, mekanik ve fiziksel analiz sonuçları Çizelge 3.5'de verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Uçucu kül kimyasal analiz sonuçları

| Kimyasal Analiz                |            |
|--------------------------------|------------|
| Madde                          | Miktar (%) |
| SiO <sub>2</sub>               | 54,49      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20,58      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9,27       |
| S+A+F                          | 84,34      |
| CaO                            | 4,26       |
| MgO                            | 4,48       |
| SO <sub>3</sub>                | 0,52       |
| K <sub>2</sub> O               | 2,01       |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,65       |
| Kızdırma Kaybı                 | 3,01       |
| Cl                             | 0,006      |
| Serbest CaO                    | 0,26       |
| Reaktif SiO <sub>2</sub>       | 39,01      |
| Reaktif CaO                    | 2,49       |

**Çizelge 3.5.** Uçucu külün fiziksel analiz sonuçları

| Fiziksel Testler                   |       |
|------------------------------------|-------|
| İncelik 45 µm elek üstü (%)        | 47,00 |
| İncelik 90 µm elek üstü (%)        | 3,20  |
| Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 2,13  |
| Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)   | 2986  |

**3.1.1.f. Silis dumanı**

Silis dumanı, demir silisyum veya silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretim yapılması sırasında elde edilen ana bileşeni 1µm'den küçük amorf, küresel, camsı

silis( $\text{SiO}_2$ ) partiküllerinden meydana gelen yüksek oranda puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silikonlu metal alaşımlarının üretimi sırasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılmasıyla elde edilen ve %85-98 oranında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye denilmektedir. Silis dumanı yüksek reaktiviteye ve ince parçacıklara sahip olduğundan dolayı yüksek dayanıma sahip ( $\geq 100$  MPa) veya erken yaşta yüksek dayanım elde edilmek istenen betonlar için süper akışkanlaştırıcılar ile kullanılmaktadır (Gündeşli 2008).

Bu çalışmada yapılan deneylerde kullanılan silis dumanının tamamı Dost Kimya'dan temin edilmiş ve fiziksel ve kimyasal özellikleri bu firmadan temin edilerek Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7' de verilmiştir.

**Çizelge 3.6.** Silis dumanı kimyasal analiz sonuçları

| Kimyasal Analiz         |            |
|-------------------------|------------|
| Madde                   | Miktar (%) |
| $\text{SiO}_2$          | 96         |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0,70       |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0,25       |
| $\text{CaO}$            | 0,50       |
| $\text{MgO}$            | 0,60       |
| $\text{SO}_3$           | 0,50       |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,85       |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,25       |
| Kızdırma Kaybı          | 1,50       |

**Çizelge 3.7.** Silis dumanı fiziksel analiz sonuçları

| Fiziksel Testler                         |        |
|------------------------------------------|--------|
| Özgül Yüzey( $\text{cm}^2/\text{g}$ )    | 210400 |
| Özgül Ağırlık ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 2,20   |

### 3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler

#### 3.1.2.a. Betonyer

Deneyisel çalışmalardaki numune betonlarının karılması işleminde, ELE firmasının ürettiği 135° açı ile manevra yapabilen 60 dm<sup>3</sup> kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır. Şekil 3.1’de kullanılan betonyer gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Betonyer

#### 3.1.2.b. Çökme-yayılma deney aleti

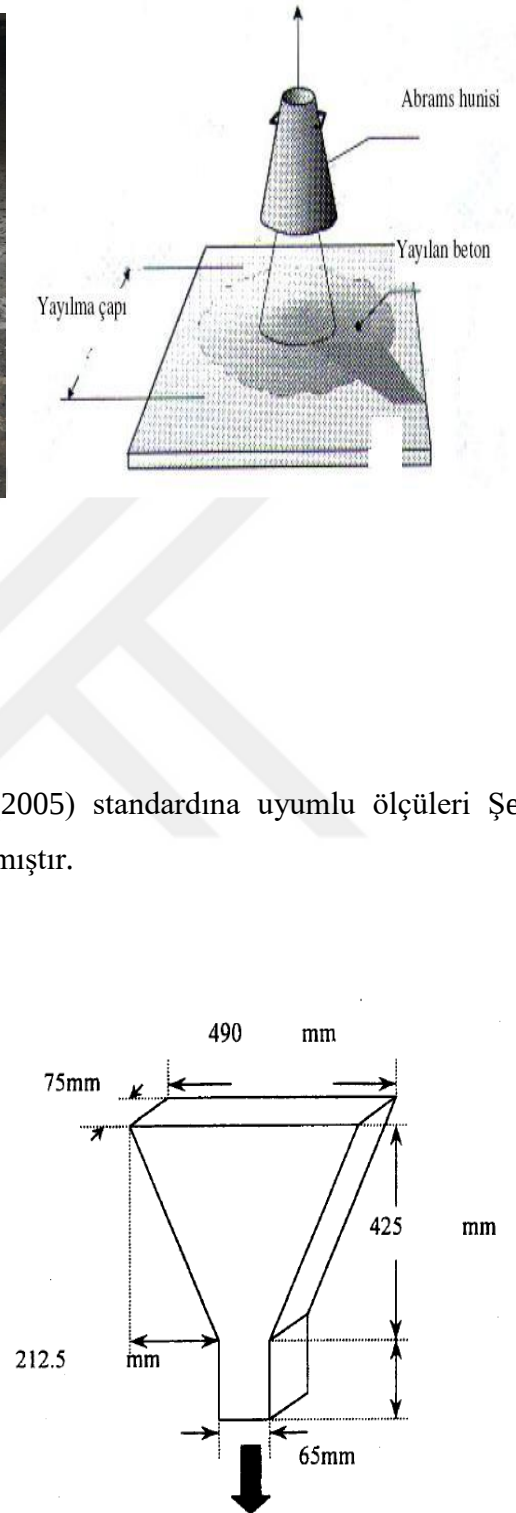
Yapılan deneysel çalışmalarda, Şekil 3.2’de gösterilen, üzerinde 20 cm ve 50 cm çaplı daireler çizili olan çelikten yapılmış 80x80 cm boyutlarında bir tabla ve bilinen Abrams hunisi kullanılmıştır.



**Şekil 3.2.** Çökme-yayılma deney aleti

### 3.1.2.c. V hunisi deney aleti

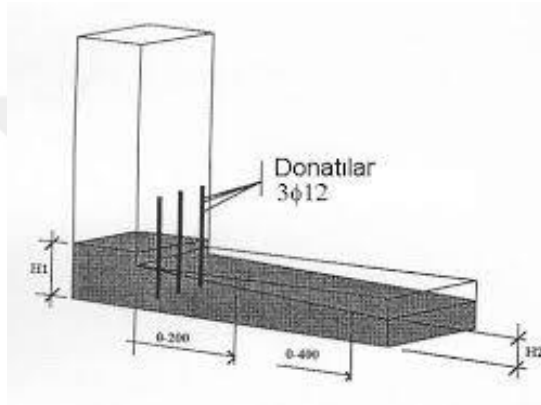
Yapılan deneysel çalışmalarda EFNARC (2005) standardına uyumlu ölçüleri Şekil 3.3'de belirtilmiş olan V şekilli huni kullanılmıştır.



**Şekil 3.3.** V hunisi deney aleti

### 3.1.2.d. L kutusu deney aleti

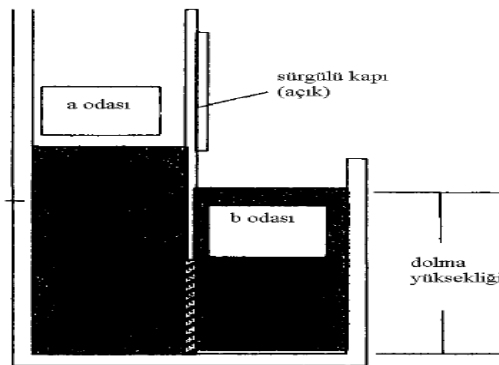
Yapılan deneysel çalışmalarda EFNARC(2005) standardına uyumlu L şeklinde çelikten yapılmış, kutunun alt ortasında sürgülü bir kapak ve aynı zamanda engel oluşturacak Ø 12 mm çapında 3 adet demir çubuk bulunan ve Şekil 3.4’de gösterilen deney aleti kullanılmıştır.



Şekil 3.4. L kutusu deney aleti

### 3.1.2.e. U kutusu deney aleti

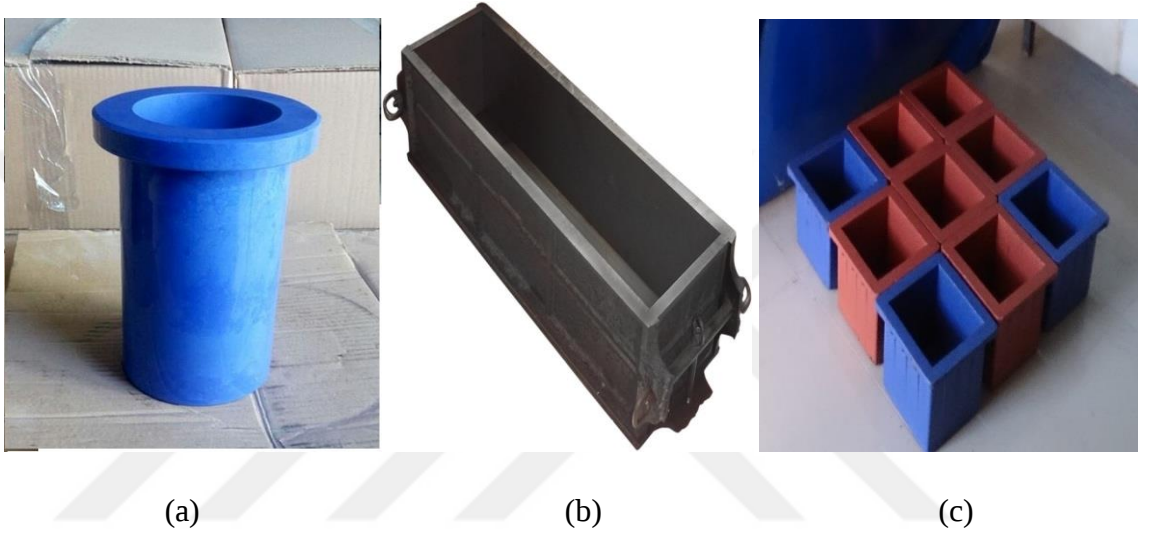
Yapılan deneysel çalışmalarda EFNARC(2005) standardına uyumlu U şeklinde çelikten yapılmış, alt ortasında sürgülü bir kapak olan ve aynı zamanda engel oluşturacak demir çubuk bulunan, Şekil 3.5’de gösterilen deney aleti kullanılmıştır.



Şekil 3.5. U kutusu deney aleti

### 3.1.2.f. Numune Kalıpları

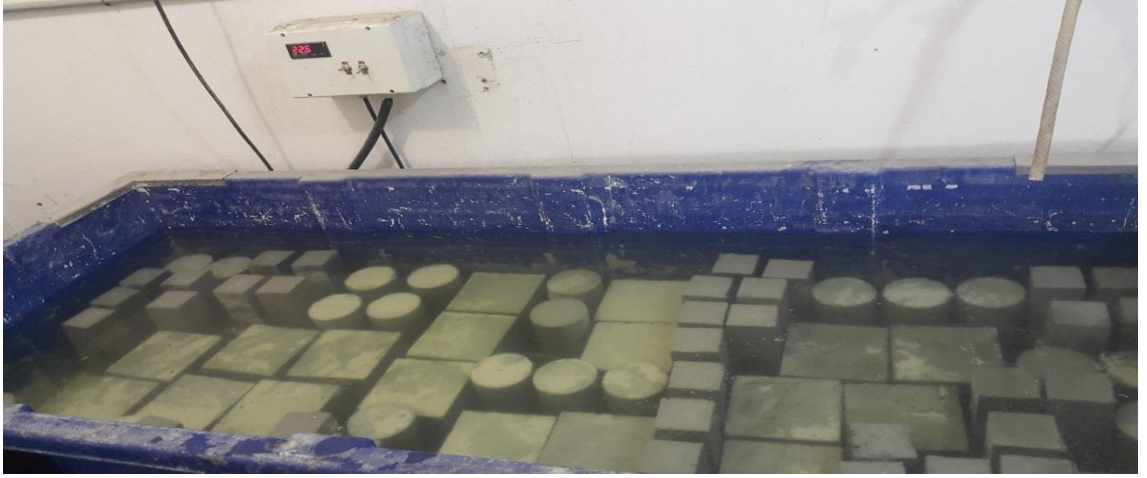
Yapılan deneysel çalışmalarda sertleşmiş plastikten imal edilmiş 15x15x15 cm boyutlarında küp, 10 cm çapında 30 cm yüksekliğinde silindir ve 7x7x28 cm boyutlarında çelikten imal edilmiş, Şekil 3.6’da gösterilen kalıplar kullanılmıştır.



**Şekil 3.6.** Numune Kalıpları (a: silindir kalıp, b: prizma kalıp, c: küp kalıp)

### 3.1.2.g. Plastik su kürü havuzu

Yapılan deneysel çalışmalarda kirece doygun durumdaki suyu  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ’de sabit tutabilen, çevrim pompalı tam dijital su kürü havuzu kullanılmıştır. Şekil 3.7’de kullanılan su kürü havuzu gösterilmektedir.



**Şekil 3.7.** Plastik kür havuzu

#### **3.1.2.h. Beton test presi**

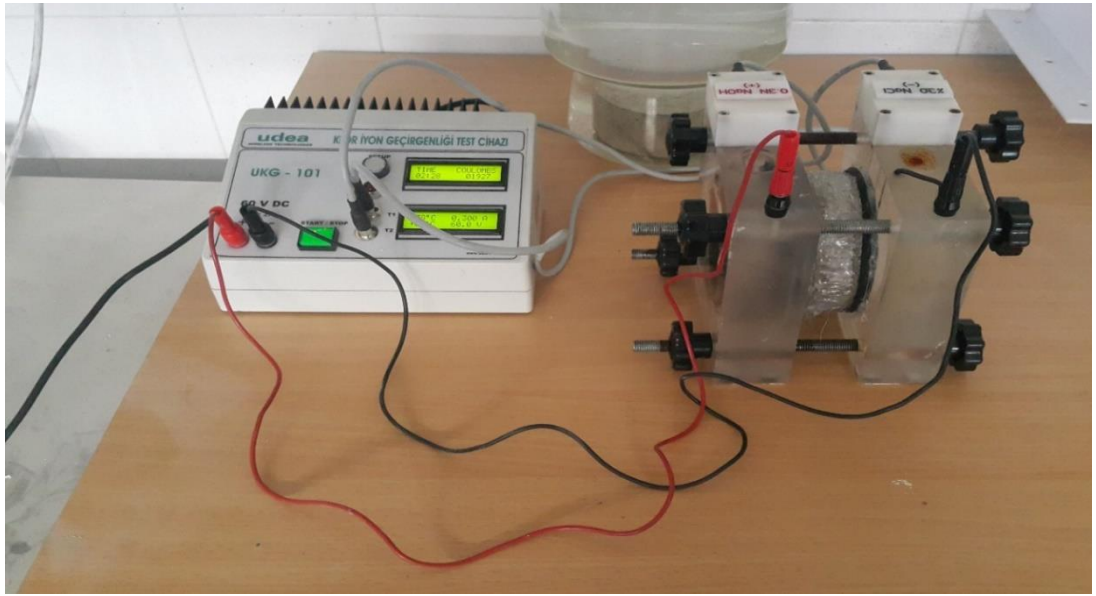
Yapılan deneysel çalışmalarda sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla kapasitesi 300 ton olan, ele marka AUTOTEST 3000 modeli hidrolik beton test presi kullanılmıştır. Şekil 3.8’de kullanılan presler gösterilmektedir.



**Şekil 3.8.** Beton test presi

### 3.1.2.i. Hızlı klor iyon geçirirmliliği test cihazı

Yapılan deneysel çalışmalarda sertleşmiş beton numunelerinin hızlı klor iyon geçirirmliliğini belirlemek amacıyla Çizelge 3.8 ve Şekil 3.9’da verilen alet kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Hızlı klor geçirirmliliği test cihazı

### 3.1.2.i. Terazi

Yapılan deneysel çalışmalarda Şekil 3.10’da gösterilen 0,1 gr hassasiyete sahip terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Terazi

### 3.1.2.j. Vakum ve desikatör

Yapılan deneysel çalışmalarda zemin mekaniği laboratuvarından temin edilen Şekil 3.11’de gösterilen vakum ve desikatör kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Vakum ve desikatör

## 3.2. Yöntem

Bu bölümde, geleneksel beton ve KYB üretiminde karışım seçeneklerinin belirlenmesi, taze beton numunelerine uygulanan deney yöntemleri, sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler açıklanmıştır.

### 3.2.1. Geleneksel beton ve KYB karışım hesapları

Geleneksel betonda yapılan karışım hesapları TS EN 206 ve TS 13515 standardına göre belirlenmiştir. KYB karışımları için TS’de herhangi bir standart olmadığından dolayı bu çalışmada karışıma girecek agrega (iri-ince), toz malzeme, çimento ve süper akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin seçimi ile karışımda kullanılacak bu malzemelerden hangi oranlarda kullanılacağını tespit edilebilmesi için EFNARC (2005) ve KYB’ler ile ilgili yapılmış çalışmalardan yararlanılmıştır.

Yapılan çalışmada Erzurum ili Aşkale ilçesinden temin edilen agrega, Aşkale çimento fabrikasından temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimento, Muğla ili Yatağan İlçesi, Yatağan Termik Santralinden temin edilen uçucu kül (UK), Dost Kimya'dan temin edilen silis dumanı ve Sabit Yapı firmasından temin edilen 1,065 g/ml yoğunluğa sahip, pH değeri 6,01 olan polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı CHRYSO Fluid HP 1106 kullanılmıştır.

Agrega tane sınıflarının oranlarının ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılarak belirlenmiştir. Geleneksel betonda 0-5 tane sınıfı ince agregadan %40, 5-25 kaba agregadan ise %60, KYB'ler de ise 0-5 tane sınıfı ince agregadan %60, 5-16 kaba agregadan ise %40 oranlarında malzeme yapılan karışımlara katılmıştır.

C 25/30 için 340 kg/m<sup>3</sup> çimento, su/bağlayıcı oranı 0,57, C 35/45 için 400 kg/m<sup>3</sup> çimento, su/bağlayıcı oranı 0,53 olarak alınmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonlarda ise çimento dozajı 550 kg/m<sup>3</sup>, su/bağlayıcı oranı 0,35 olarak sabit tutulmuştur.

Mineral katkı malzemelerinden uçucu kül toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça yaklaşık %15 (82,50 kg/m<sup>3</sup>), %30 (165 kg/m<sup>3</sup>) ve %45 (247,50 kg/m<sup>3</sup>) oranlarında, silis dumanı ise %5 (27,50 kg/m<sup>3</sup>), %10 (55 kg/m<sup>3</sup>) ve %15 (82,50 kg/m<sup>3</sup>) oranlarında çimento ile ikame edilerek kullanılmıştır.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı geleneksel betonlar için toplam bağlayıcı miktarının yaklaşık %1,2'si kadar katılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonlar da ise %1,92'si kadar katılmış ve sabit tutulmuştur.

Çimento dozajı ve su/bağlayıcı oranı sabit tutularak karışım suyu C25/30 için 194 kg, C35/45 için 210 kg, KYB'ler için 192,50 kg olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan su miktarlarına bağlayıcı hacmi ve tüm karışımlar için seçilen %1 hava hacmi eklenmiş ve 1000 dm<sup>3</sup>'den çıkarılarak 1 m<sup>3</sup> beton için gerekli olan toplam agrega hacmi tespit edilmiştir. Elde edilen agrega hacmi iri ve ince agrega olarak sınıflarına ayrılmıştır.

Tüm beton sınıfları için karışıma giren malzeme miktarları hesaplanmış ve karışımlar bu hesaplama göre hazırlanmıştır. Karışıma giren malzeme miktarları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Geleneksel beton ve KYB grupları için malzeme miktarları (1 m<sup>3</sup> beton için)

| Malzeme<br>Grup | Çimento<br>(kg) | SD<br>(kg) | UK<br>(kg) | Toplam<br>Bağlayıcı<br>(kg) | İnce<br>Agrega<br>(kg) | İri<br>Agrega<br>(kg) | Akış.<br>Katkı<br>(kg) | Su<br>(kg) |
|-----------------|-----------------|------------|------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|------------|
| C25/30          | 340             | ---        | ---        | 340,00                      | 920,00                 | 882,00                | 4,08                   | 194,00     |
| C35/45          | 400             | ---        | ---        | 400,00                      | 810,00                 | 926,00                | 4,80                   | 210,00     |
| KYB KONT.       | 550             | ---        | ---        | 550,00                      | 989,50                 | 662,50                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %5 SD       | 522,50          | 27,50      | ---        | 550,00                      | 982,50                 | 657,50                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %10 SD      | 495,00          | 55,00      | ---        | 550,00                      | 975,00                 | 652,50                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %15 SD      | 467,50          | 82,50      | ---        | 550,00                      | 967,50                 | 647,50                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %15 UK      | 467,50          | ---        | 82,50      | 550,00                      | 933,50                 | 624,50                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %30 UK      | 385,00          | ---        | 165,00     | 550,00                      | 922,50                 | 615,00                | 10,50                  | 192,50     |
| KYB %45 UK      | 302,50          | ---        | 247,50     | 550,00                      | 914,50                 | 609,50                | 10,50                  | 192,50     |

Karışımındaki malzeme miktarları, karışıma ağırlık olarak konularak deney numuneleri üretilmiştir. Bu işlem esnasında malzeme kayıpları da göz önünde bulundurularak gerekli miktarlar %15 oranında artırılmıştır. 9 grup için toplam 144 adet numune dökülmüş ve bu numuneler üzerinde gerekli deneyler yapılmıştır. Üretilen toplam beton miktarı 414 dm<sup>3</sup>’tür.

### 3.2.2. Geleneksel beton ve KYB taze beton deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde geleneksel beton ve KYB de taze beton deneyleri yapılmıştır. Bunlar tüm beton sınıflarında taze birim hacim ağırlığı tayini, geleneksel betonda slump (Abrams Konisi), KYB’ler de ise çökme-yayılma, V hunisi, L kutusu, U kutusu

deneylerinde izlenen yöntemler açıklanmıştır. KYB deneylerinin sonuçları EFNARC (2005)'de tavsiye edilen sınır değerlere göre kontrol edilmiştir. KYB deney sonuçları ayrıca EFNARC (2005)'de verilen değerlere göre de sınıflandırılmıştır. KYB deney sonuçları için tavsiye edilen sınır değerler Çizelge 3.9'da, deney sonuçlarına göre KYB sınıflandırmaları ise Çizelge 3.10'da verilmiştir.

**Çizelge 3.9.** KYB deneyleri için sınır değerler (EFNARC 2005)

| Deney                          | Birim                                | Min. Değer | Max. Değer |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------|------------|
| Çökme-yayılma                  | mm                                   | 650        | 850        |
| T <sub>50</sub> yayılma süresi | sn                                   | 2          | 5          |
| V hunisi                       | sn                                   | 6          | 12         |
| V hunisi 5 dk gecikmeli        | sn                                   | 0          | +3         |
| L kutusu                       | H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>       | 0,8        | 1,0        |
| U kutusu                       | (H <sub>2</sub> -H <sub>1</sub> ) mm | 0          | 30         |

**Çizelge 3.10.** KYB sınıfları (EFNARC 2005)

| Yayılma sınıfları        | Yayılma çapı (mm)                                       |                                 |
|--------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------|
| SF1                      | 550-650                                                 |                                 |
| SF2                      | 660-750                                                 |                                 |
| SF3                      | 760-850                                                 |                                 |
| Viskozite sınıfları      | 500 mm çapa yayılma süresine göre, T <sub>500</sub> (s) | V-kutusu akış süresine göre (s) |
| VS1 / VF1                | ≤ 2                                                     | ≤ 8                             |
| VS2 / VF2                | > 2                                                     | 9-25                            |
| Geçiş yeteneği sınıfları | Bloklanma oranı                                         |                                 |
| PA1                      | ≥ 0,80 (2 donatı engeli ile)                            |                                 |
| PA2                      | ≥ 0,80 (3 donatı engeli ile)                            |                                 |
| Ayrışma direnci          | Ayrışma direnci (%)                                     |                                 |
| SR1                      | ≤ 20                                                    |                                 |
| SR2                      | ≤ 15                                                    |                                 |

### 3.2.2.a. Taze birim hacim ağırlığı tayini

Taze birim hacim ağırlığının belirlenmesi için küp numune kalıpları kullanılarak 0,1 g hassasiyetindeki laboratuvar terazisi ile tartılarak, ağırlığın hacime bölünmesiyle taze birim hacim ağırlığı tespiti yapılmıştır.

Taze birim hacim ağırlığı tayini tüm seriler için üçer kez yapılarak ortalamaları alınmıştır. Çalışmanın sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir. yapılan çalışmadan Şekil 3.12'de bir örnek gösterilmiştir.

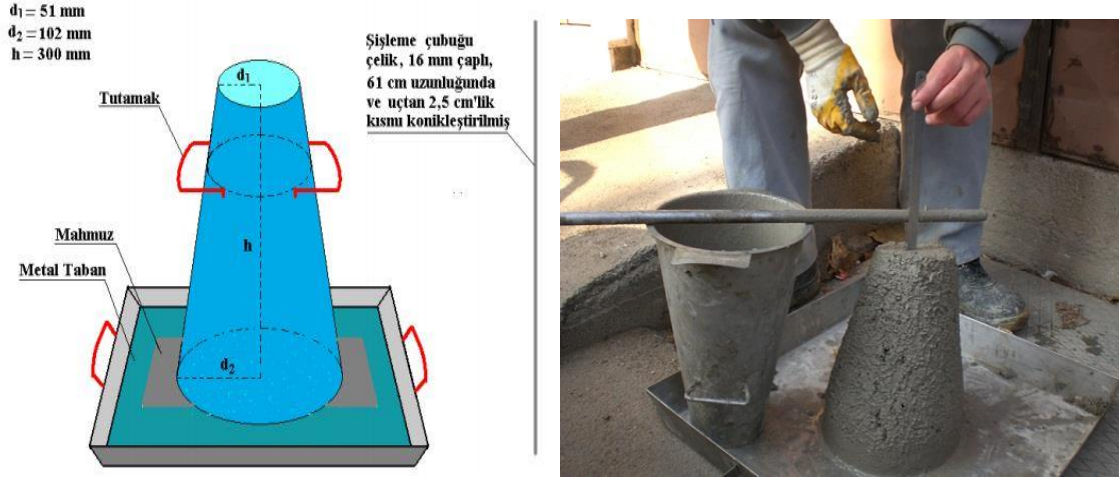


**Şekil 3.12.** Taze birim hacim ağırlığı deneyi

### 3.2.2.b. Slump (Abrams Konisi) deneyi

Deney malzemelerinden olan metal taban düz bir zemin üzerine yerleştirildi. Abrams konisi metal taban üzerine konuldu ve mahmuzlarına basılarak sabit kalması, hareket etmemesi sağlandı. Huninin 1/3'lük kısmı betonla doldurulduktan sonra 25 defa şişleme yapıldı. Aynı işlem 2 defa daha tekrarlandı. Huninin ağzındaki beton düzlendikten sonra huni düz bir şekilde yukarıya doğru çekildi ve çekilen huni kalıptan çıkan betonun

yanına konularak çökme miktarı tespit edildi. Şekil 3.13’de gösterilen deney yöntemi geleneksel betonlarda gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.13.** Slump (Abrams Konisi) deneyi

### 3.2.2.c. Çökme - Yayılma deneyi

EFNARC (2005)’a uygun olarak yapılan deney, taze halde ki KYB’nin kendi ağırlığı altında yayılarak oluşturacağı yayılmanın çapının ölçülmesini ve deformasyon hızının gözlemlenmesini kapsayan deney yöntemidir. Doldurma kabiliyetini ölçmek için kullanılan yöntemdir. Deney malzemeleri olarak 80 cm x 80 cm ebatlarında bir tabla ve abrams (slump) konisi kullanılmıştır. Tablaya 50 cm çapında daire çizilerek abrams konisi dairenin merkezine yerleştirilmiştir. Beton şileme yapılmadan abrams konisine doldurulduktan sonra koni yukarı doğru çekilerek herhangi bir sarsma yapılmadan kendi ağırlığı ile yayılması beklenerek aşağıdaki değerler ölçülmüştür. KYB’nin 50 cm çaplı daireye gelinceye kadar geçen zaman miktarı bir kronometre yardımıyla ölçülmüş ve not edilmiştir ( $T_{50}$ ). Yayılma durduktan sonra oluşan dairenin birbirine dik iki çapı ölçülerek ortalaması alınmış ve KYB’nin yayılma çap değeri tespit edilmiştir.

Şekil 3.14’de gösterilen çökme- yayılma deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü’nde verilmiştir.



**Şekil 3.14.** Çökme - Yayılma deneyi

#### 3.2.2.d. V hunisi deneyi

EFNARC (2005)’a uygun olarak yapılan deney, taze halde ki KYB’nin kendi ağırlığı ile özel şekilde tasarlanan bir huninin dar ağzından geçme süresinin ölçülmesi esasına dayanır. Deney sayesinde KYB’nin geçiş yeteneği, doldurma kabiliyeti ve viskozitesi hakkında bilgi sahibi olunur. V hunisi deney aparatına hiçbir sıkıştırma işlemi uygulanmadan KYB doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra, alttaki sürgülü kapak açılıp, üstten bakıldığında ışık görünene kadar geçen beton akış süresi bir kronometre yardımıyla ölçülmüş ve V hunisi akış süresi olarak kayıt edilmiştir.

Şekil 3.15’de gösterilen V hunisi deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü’nde verilmiştir.



**Şekil 3.15.** V hunisi deneyi

### 3.2.2.e. L kutusu deneyi

EFNARC (2005)'a uygun olarak yapılan deney, taze haldeki KYB'nin geçiş yeteneği, doldurma yeteneği, yerleşme yeteneği ve ayrışmaya karşı direncinin L şeklindeki bir kutu içerisinde gözlenmesini içeren deneydir. Deney aleti kare kesitli bir kutu ile bunun önünde yatay şekilde yer alan diğer bir kutudan oluşmaktadır. Kutunun orta kısmının alt tarafında sürgülü bir kapak ve engel teşkil etmesi için 12 mm çaplı ve 34 mm aralıklı 3 adet demir çubuklar mevcuttur. Mikserden alınan taze beton L kutusuna hiçbir sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulmuş ve üzeri düzeltildikten sonra, sürgülü kapak çekilerek KYB'nin donatılar arasından geçerek diğer bölüme 20 cm ve 40 cm ilerleme süreleri ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra betonun engeller arasından akışını tamamlayıp durması beklenmiş, L kutusu ucundaki beton yüksekliği ( $H_2$ ) ve kapağın hemen önündeki beton yüksekliği ( $H_1$ ) ölçülerek L kutusu bloklanma oranı ( $H_2/H_1$ ) hesaplanarak kaydedilmiştir.

Şekil 3.16'da gösterilen L kutusu deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.



**Şekil 3.16.** L kutusu deneyi

### 3.2.2.f. U kutusu deneyi

EFNARC (2005)'a uygun olarak yapılan deney, U şeklindeki iki kutunun yan yana yerleştirilmesi ve aralarında alttan 19 cm bölüm açık olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu açıklığa 10 mm çaplı 5 adet çelik çubuk aralarında 35 mm boşluk olacak şekilde düşey konumda yerleştirilmiş ve bu boşluk hareket edebilen bir kapak yardımıyla kapatılmıştır. Yapılan bu deneyde beton hem engeller arasından geçme yeteneği hem de doldurma yeteneği ölçülür. Mikserden alınan taze beton U kutusuna hiçbir sıkıştırma işlemi yapmadan yerleştirilmiştir. Daha sonra sürgülü kapak çekilmiş betonun diğer kısma doğru dolarak yükselmesi beklenmiştir. Kutunun iki kolu arasındaki yükseklik farkı ölçülerek kaydedilmiştir.

Şekil 3.17’de gösterilen U kutusu deneyi tüm seriler için yapılmış olup sonuçları Araştırma Bulguları Bölümü’nde verilmiştir.



**Şekil 3.17.** U kutusu deneyi

### 3.2.3. Su kürü seçeneklerinin belirlenmesi

Su kürü seçenekleri belirlenirken değerlendirme ve karşılaştırma için tüm gruplar toplam olarak 144 adet numune üretilmiş ve bu numunelere 28 gün ve 180 gün su kürü uygulanmıştır. Yapılan su kürü uygulamasında kirece doymun durumdaki suyu  $20\pm2^{\circ}\text{C}$ ’de sabit tutabilen, çevrim pompalı dijital su kürü havuzu kullanılmıştır. Şekil 3.18’de kullanılan su kürü havuzu gösterilmektedir.

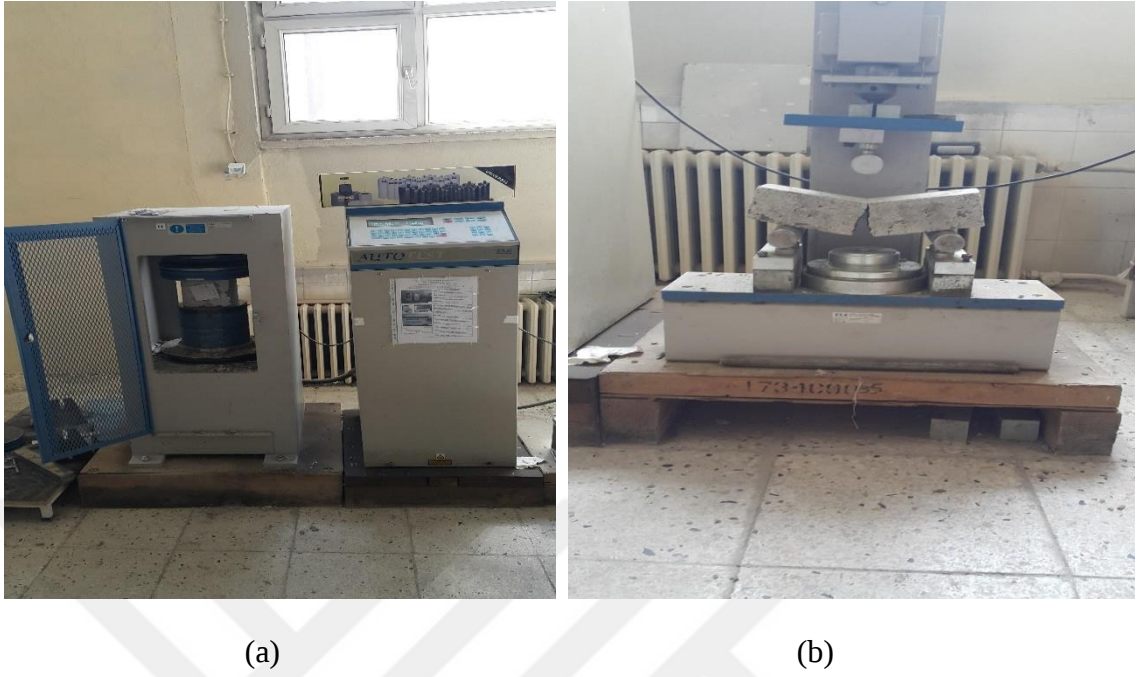


**Şekil 3.18.** Su kürü

#### **3.2.4. Basınç dayanımı tayini yöntemi**

Basınç dayanımları suda kür edilen numunelerin 28. ve 180. günde belirlenmiştir. Beton basınç dayanımı, yükleme hızından önemli ölçüde etkilenir. Tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. TS EN 12390-3 (2010)'a göre bu değer 0,2 - 1 MPa/s arasında olmalıdır. Bu deneyde beton numunelerinin kırılması işlemi, yükleme hızı 0,5 MPa/s seçilerek yapılmıştır. Şekil 3.19'da kullanılan beton pres aletleri gösterilmektedir.

Farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir.



**Şekil 3.19.** (a): Basınç dayanımı test aleti (b): Eğilme dayanımı test aleti

### 3.2.5. Hızlı klor iyon geçirimsiliği tayini

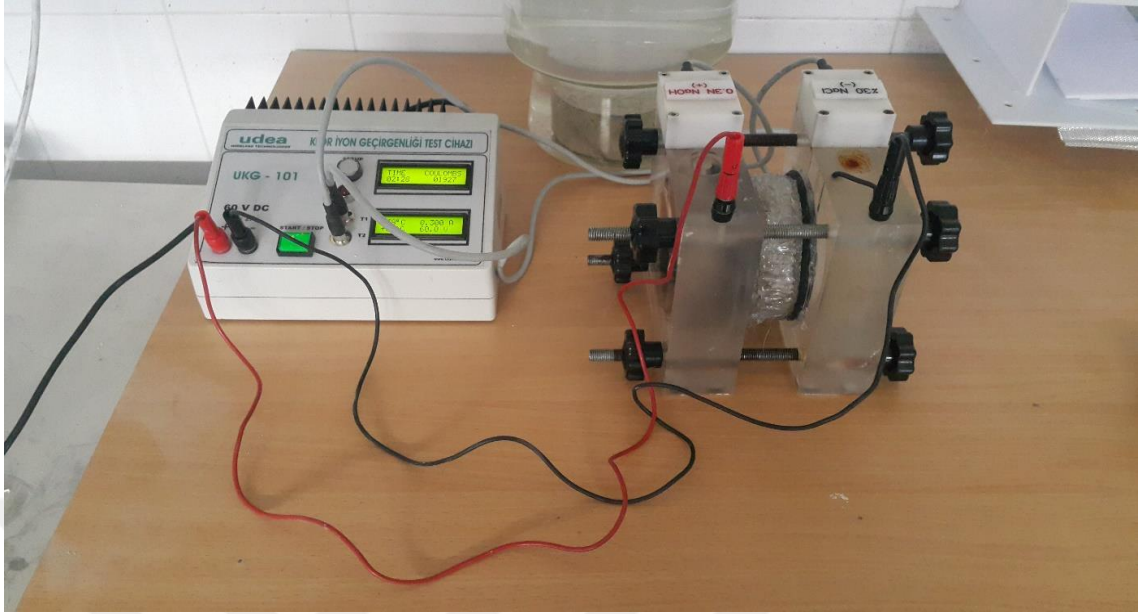
Hızlı Klor Geçirimsiliği Deneyi elektriksel iletkenliğe göre betonun geçirimsiliğinin tespit edildiği deney yöntemidir. AASHTO T277 ve ASTM C1202 yöntemleri yardımıyla hızlı klorür geçirimsilik testleri yapılır. Deney; kalınlığı  $5 \pm 2$  mm, çapı 100 mm olan, silindir numunelerin kesilmesiyle elde edilen numuneler üzerinde yapılır. Disk şeklinde olan numuneler yan yüzleri elektrik iletmeyen ve suyun sızmasını engelleyen bir yalıtım malzemesi ile kaplanır. Sonra numunelere 3 saat boyunca vakum uygulanır. Ardından vakum hazinesi su doldurularak 1 saat daha vakumlama işlemi devam eder. Bu şekilde numuneler 1saat boyunca su emdirilerek suya doymun olması sağlanır. Deney başlayana kadar da numuneler su içerisinde çıkarılmaz. Numuneler sudan çıkarıldıktan sonra çözelti hücrelerinin yer aldığı deney aletine yerleştirilirler. Deney aletindeki çözeltiler %3 konsantrasyonlu NaCl ve 0,3M NaOH çözeltileridir. Hücreler içine doldurulan çözeltilerle numunelerin temasına izin veren ve disk numunelerle uygun boyutlarda tasarıma sahiptir. Deney için hücrelerden biri sodyum klorür diğeri ise sodyum hidroksit ile doldurulur. Ardından 60 V sabit potansiyel farkı

uygulanarak beton diskten geçen akım şiddetinin miktarı 30 dk. aralıklarla ölçülerek kaydedilir. 6 saat süren deney sonunda numuneden geçen akım şiddeti – zaman grafiği çizilir ve alan yardımıyla coulomb cinsinden iletilen elektrik akım miktarı bulunur. Şekil 3.20’de deney aleti gösterilmiştir ve Çizelge 3.11’de de ASTM C 1202’ye göre geçirimsizlik değerleri verilmiştir.

**Çizelge 3.11.** Hızlı Klor İyon Geçirimsizlik deney sonuçlarına göre betonun klor geçirimsizliği yönünden değerlendirilmesi (ASTM C 1202, 1997).

| Geçen elektriksel yük miktarı<br>(coulomb) | Klor İyonu Geçirimsizliği<br>Yönünden Değerlendirme |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| >4000                                      | Yüksek                                              |
| 2000-4000                                  | Orta                                                |
| 1000-2000                                  | Düşük                                               |
| 100-1000                                   | Çok düşük                                           |
| <100                                       | İhmal edilebilir                                    |

Suda küre tabi tutulan numunelerin 180. günde hızlı klor iyon geçirimsizlikleri belirlenmiştir. Geleneksel betonla ve farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı kullanılarak üretilmiş KYB’ler hızlı klor iyon geçirimsizliği yönünden karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.20. Hızlı klor iyon geçirirmliliği tayini

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, geleneksel beton ile farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül içeren KYB'lerin taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları tablolar ve grafikler halinde sunulmuştur.

Karşılaştırma geleneksel beton ile farklı oranlarda ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek üretilen mineral katkılı KYB numuneleri ve kontrol numuneleri arasında yapılmıştır. Yapılan çalışmada aynı kür şartları altında geleneksel betonun, kontrol betonunun (katkısız KYB) ve silis dumanı ile uçucu kül içeren KYB'lerin basınç dayanımları, eğilme dayanımları, hızlı klor iyon geçirimsizlikleri incelenmiştir.

##### 4.1. Taze Beton Deneyleri

Çalışmanın bu bölümünde geleneksel beton, mineral katkısız ve katkılı KYB grupları için taze betonda birim hacim ağırlık, geleneksel beton için slump testi, KYB'ler için çökme-yayılma, V hunisi, L kutusu ve U kutusu deneyleri yapılmıştır. KYB'lerin taze beton özellikleri belirlenerek sonuçlar çizelgeler halinde verilmiştir.

##### 4.1.1. Taze beton birim hacim ağırlık deney sonuçları

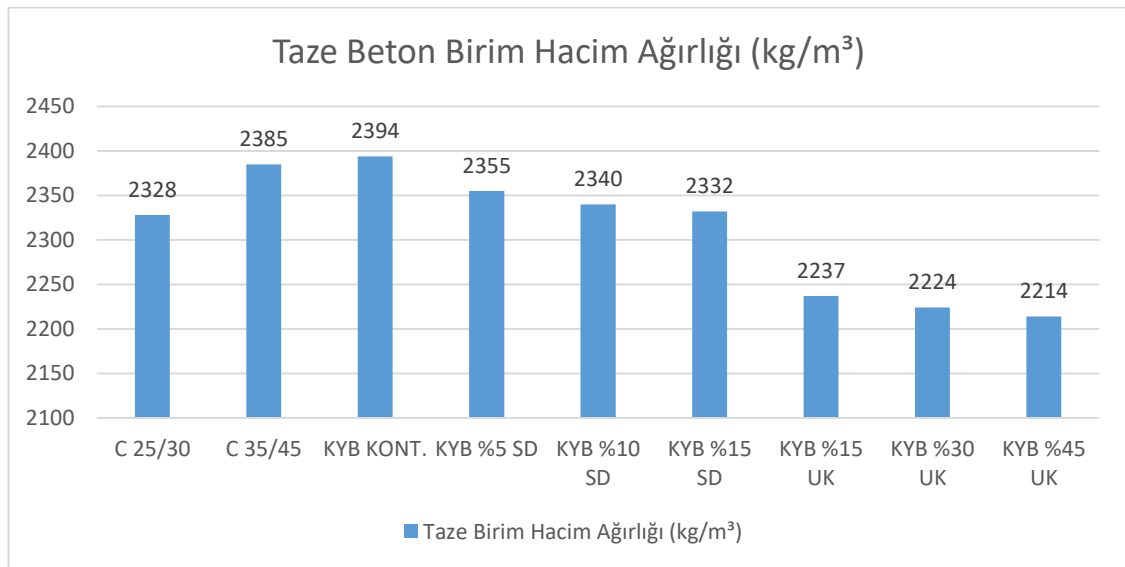
Taze birim hacim ağırlığının belirlenmesi için standart küp numune kabı kullanılmıştır. Üretilen betonlar laboratuvar betonyerinden homojen şekilde alınmış ve kaba sıkıştırma işlemi yapılmadan doldurulmuştur. Numuneler 0,1 g hassasiyete sahip terazide tartılmış, bu değer hacime bölünerek numunelerin taze birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Deney sonucunda hesaplanan değerler Çizelge 4.1'de topluca verilmiştir. Tüm betonların ağırlıkça yazılan sınıflandırma da normal beton grubundan olduğu görülmüştür. TS EN 206-1'de birim ağırlığı  $2000 \text{ kg/m}^3$ 'ten az olan betonlar hafif beton,  $2000 - 3000 \text{ kg/m}^3$  arasında olan betonlar normal beton,  $3000 \text{ kg/m}^3$ 'ten daha

ağır betonlar ise ağır beton olarak sınıflandırılır. Buna göre çalışma da kullanılan tüm gruplar normal beton sınıfındadırlar.

**Çizelge 4.1.** Numunelerin taze beton birim hacim ağırlıkları

| Numune Grubu | Taze birim hacim ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|------------------------------------------------|
| C25/30       | 2328                                           |
| C35/45       | 2385                                           |
| KYB KONT.    | 2394                                           |
| KYB %5 SD    | 2355                                           |
| KYB %10 SD   | 2340                                           |
| KYB %15 SD   | 2332                                           |
| KYB %15 UK   | 2237                                           |
| KYB %30 UK   | 2224                                           |
| KYB %45 UK   | 2214                                           |

Yapılan taze beton ağırlık deney sonuçlarına göre; C25/30, C35/45, KYB KONT. , çimento yerine %5, %10 , %15 SD ve %15, %30, %45 UK kullanılarak üretilen KYB'lerin kontrol betonuna göre taze beton birim hacim ağırlıkları Şekil 4.1'de görüldüğü gibidir.



**Şekil 4.1.** Numunelerin taze beton birim hacim ağırlıklarının karşılaştırılması

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi KYB KONT. betonunun birim ağırlığının geleneksel betona göre artış göstermesinin nedeni olarak; kullanılan ince malzeme miktarının fazla olması söylenebilir. Katkılı betonlarda meydana gelen azalma ise SD ve UK birim hacim ağırlığının çimentonunkinden düşük olmasından dolayı katkılı karışımların birim hacim ağırlığı düşmüştür. Ayrıca SD birim hacim ağırlığının UK birim hacim ağırlığından daha fazla olduğu göz önüne alınırsa SD kullanılarak üretilen betonların UK kullanılarak üretilen betonlara göre daha ağır ölçülmüştür. Kullanılan mineral katkı oranı arttıkça da birim hacim ağırlığında buna paralel olarak azalma görülmektedir.

Yener (2004)’te yapmış olduğu çalışmasında çimento yerine %5, %10 SD, %5, %10, %15 UK ve SD ile UK beraber kullanarak yapmış olduğu birim hacim deneyi sonucunda benzer şekilde mineral katkı oranı arttıkça kontrol betonuna göre azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. Yılmaz (2018) yapmış olduğu çalışmasında çimento yerine %30, %40 ve %50 UK kullanarak ürettiği beton numunelerinin taze beton birim hacim ağırlık deney sonuçlarında kontrol betonuna göre azalma olduğunu belirtmiştir. Kullanılan UK oranı arttıkça taze beton birim hacim ağırlığında azalma göstermiştir. Aynı şekilde Kurt (2007)’de çimento yerine silis dumanı kullanılarak ürettiği numuneleri taze beton birim hacim ağırlığı deney sonuçlarına göre SD oranı arttıkça birim hacim ağırlığının azaldığını gözlemlemiştir.

#### **4.1.2. Geleneksel betonlar için slump deney sonuçları**

Bu deneyde geleneksel betonların kıvam sınıflarını belirlemek amacıyla yapılmış bir deney türüdür. Çizelge 4.2’de bulunan değerler verilmiştir. TS EN 206-1’de kıvam sınıflarından çökme sınıflarının ayrımı 10-40 arası S1, 50-90 arası S2, 100-150 S3, 160-210 arası S4 ve  $\geq 220$  için ise S5 olarak ayrılmıştır. Buna göre çalışmada kullanılan geleneksel beton sınıfları S3 sınıfındadır.

**Çizelge 4.2.** Geleneksel betonların slump değerleri

| Numune grubu | Slump değeri (mm) |
|--------------|-------------------|
| C25/30       | 140               |
| C35/45       | 120               |

**4.1.3. Çökme-yayılma deney sonuçları**

Çökme-yayılma deneyi KYB için 50 cm'ye kadar yayılma çapının ve yayılma süresinin belirlendiği deney çeşididir. Bu deney sayesinde elde edilen değerler betonun akış hızı ve plastik viskozitesi hakkında bilgi verir. Akış süresinin yüksek olması yani yayılma çapının düşük olması yüksek viskoziteyi göstermektedir. KYB'de 50 cm yayılma çapına kadar geçen süreye  $T_{50}$  olarak isimlendirilir (Kurt 2009).

EFNARC (2002)'ye göre yayılma çapı 650-800 mm,  $T_{50}$  süresi 2-5 sn. olarak belirlenmiştir. EFNARC (2005)'e göre ise değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceği belirtilerek yayılma çapları için 3 farklı,  $T_{50}$  süresi için ise 2 farklı sınıflandırma yöntemine gidilmiştir. Bu sınıflandırma yöntemleri sırasıyla Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Yayılma çapına göre beton sınıflandırılması (EFNARC 2005)

| Yayılma Çapı (mm) | Beton Viskozite Sınıfı |
|-------------------|------------------------|
| 550-650           | SF1                    |
| 660-750           | SF2                    |
| 760-850           | SF3                    |

**Çizelge 4.4.** Yayılma süresine ( $T_{50}$ ) göre belirlenen viskozite sınıfları (EFNARC 2005)

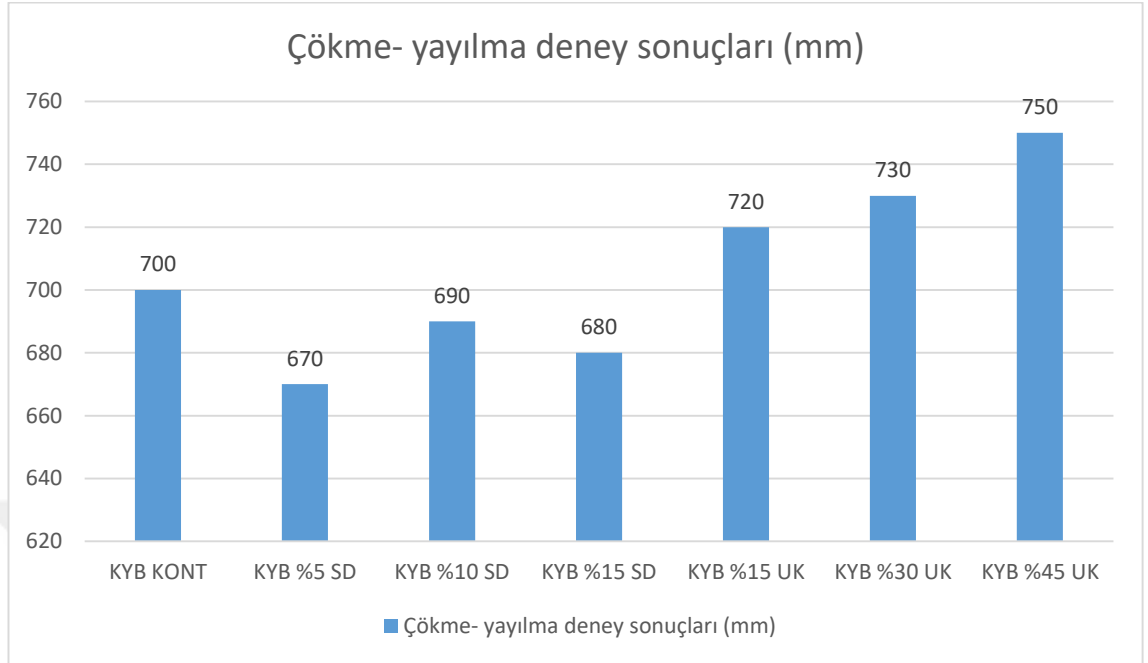
| $T_{50}$ Süresi (sn) | Beton Viskozite Sınıfı |
|----------------------|------------------------|
| $T_{50} \leq 2$      | VS1                    |
| $T_{50} > 2$         | VS2                    |

EFNARC (2005)'e uygun olarak tüm seriler için yapılan çökme-yayılma deneyinden elde edilen yayılma çapı ve 50 cm'ye yayılma süresi ( $T_{50}$ ) değerleri tüm gruplar için Çizelge 4.5'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Çökme-yayılma deney sonuçları

| Numune Grubu | Yayılma miktarı (mm) | EFNARC'a göre yayılma çapı sınıfı | $T_{50}$ süresi (sn) | EFNARC'a göre viskozite sınıfı |
|--------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| KYB KONT.    | 700                  | SF2                               | 2,35                 | VS2                            |
| KYB %5 SD    | 670                  | SF2                               | 2,40                 | VS2                            |
| KYB %10 SD   | 690                  | SF2                               | 2,45                 | VS2                            |
| KYB %15 SD   | 680                  | SF2                               | 2,58                 | VS2                            |
| KYB %15 UK   | 720                  | SF2                               | 2,55                 | VS2                            |
| KYB %30 UK   | 730                  | SF2                               | 2,65                 | VS2                            |
| KYB %45 UK   | 750                  | SF2                               | 2,80                 | VS2                            |

Deney yapılan tüm grup KYB'ler için elde edilen sonuçlar EFNARC 2005'te belirtilen sınır değerler arasında kalmıştır. En düşük yayılma çapı 670 mm ile KYB %5 SD olurken, en yüksek yayılma çapı 750 mm ile KYB %45 UK olmuştur. KYB KONT betonuna göre %5 SD'de %4'lük, %10 SD'de %2'lik ve %15 SD'de %3'lük bir azalma meydana gelirken %15 UK'da %3'lük, %30 UK'da %4'lük ve %45 UK'da %7'lik bir artış meydana gelmiştir. EFNARC 2005'e göre yayılma çapları dikkate alındığında tüm beton sınıflarının SF2 sınıfındadır. Viskozite için belirlenen  $T_{50}$  süresine göre ise; tüm gruplar VS2 sınıfında yer almaktadır. Şekil 4.2'de tüm numune gruplarına ait çökme-yayılma deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.2.** Çökme-yayılma deney sonuçlarının karşılaştırılması

Çimento yerine UK kullanılarak üretilen betonların su ihtiyacı UK kullanılmadan üretilen betonlara göre aynı slump değeri için daha azdır. UK su ihtiyacını azaltmakta ki rolünü inceliğine bağlayabiliriz. İnceliğin artması su ihtiyacını artırırken, küresel şekilli taneler içsel sürtünmeyi azaltmaktadır. Buna bağlı olarak su ihtiyacında azalma olmaktadır. UK puzolanik reaksiyonundan dolayı bağlayıcı hamurun hacmini artırır. Çimento ile yer değişimi ağırlık olarak yapıldığında, UK yoğunluğu çimentonun yoğunluğundan düşük olduğundan bağlayıcı madde hacmi artış göstermektedir. Boşlukların yeterli miktarda bağlayıcı madde ile dolması sonucu yapışkanlık, plastiklik ve agrega tanelerinin kayganlaşması sağlanır. UK inceliği ve tanelerinin küresel olması da agregalar arasında ki sürtünmeyi azaltarak betonun daha rahat hareket etmesine imkân sağlar (Gündeşli 2008).

Çimento yerine ikame edilen UK kullanım oranına göre KYB'nin kendi ağırlığı altında yerleşebilme, geçiş yeteneği, doldurma yeteneği ve akıcılık özelliklerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. UK oranında yapılan fazla miktarda ki artış viskoziteyi düşürmektedir. Bundan dolayı KYB'de kullanılan UK miktarının optimum seviyede

tutulması gerekliliği ve viskozite düzenleyici katkı kullanılması gerektiğini söyleyebiliriz.

SD kullanılarak üretilen beton sadece çimento kullanılarak üretilen betona göre çok daha koheziftir. Gerek katı taneciklerinin arasında çok temas olması gerekse yüksek kohezyon SD kullanılarak üretilen betonların işlenebilirliğini azaltmaktadır. SD arttıkça betonun hava içeriğinin ve işlenebilirliğinin azaldığını söyleyebiliriz. SD'li betonların yapışkanlığında ki artış, SD partiküllerinin yüzey alanının büyük olması nedeniyle içteki su alma reaksiyonu ve çimentosal malzemelerin taneleri arasında ki temas alanlarının artışına bağlıdır (Gündeşli 2008).

Çimento yerine ikame edilen silis dumanının kullanım oranına göre KYB'nin kendi ağırlığı altında yerleşebilme, geçiş yeteneği, doldurma yeteneği ve akıcılık özelliklerinde UK'nın tam tersi olumsuz yönde etki ettiği gözlemlenmiştir.

Eroğlu vd (2007) yaptıkları çalışmalarında UK kullanımının KYB'nin dar kesitlerden geçebilme yeteneğini, ayrışmaya karşı direncini, akıcılığını ve KYB'nin kendiliğinden yerleşebilme özelliğini elde etmek için süperakışkanlaştırıcı miktarının azaltılmasında kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Böylece KYB'nin kimyasal katkı kullanımından dolayı ortaya çıkan maliyetinde azalacağını söylemişlerdir. Yılmaz (2018) yaptığı çalışmada %30, %40 ve %50 UK kullanarak ürettiği KYB'nin çökme-yayılma deney sonuçları incelenmiştir. %30 UK içeren deney sonuçlarına göre diğer karışım oranları kıyaslandığında %40 UK da %6, %50 UK da ise %3'lük bir artış olduğu görülmüştür. Orhan (2012) yaptığı çalışmasında %10 ve %20 SD kullanarak ürettiği KYB'de farklı oranlarda akışkanlaştırıcı katkı kullanmasına rağmen SD oranı arttıkça çökme-yayılma miktarının da azaldığını belirtmiştir. Kontrol betonuna göre %10 SD kullanılan KYB'de %9 luk bir azalma, %20 SD kullanılan betonda ise %32 lik bir azalma görülmüştür. SD kullanılan betonları kendi içerisinde değerlendirecek olursak %10 SD kullanılan beton %20 SD kullanılan betona göre %25 daha fazla çökme-yayılma çapı değerine sahiptir.

#### 4.1.4. V-Hunisi deney sonuçları

Deney taze halde bulunan KYB'nin kendi ağırlığı altında özel tasarlanmış bir huninin dar olan ağız kısmından boşalma süresinin ölçülmesi esasını içerir. KYB'nin boşluklardan geçebilme yeteneğini ölçmek için yapılan KYB deney çeşididir. Deney, KYB'nin viskozite ve geçiş yeteneği hakkında bilgi verir.

EFNARC (2002)'de V hunisi akış süresini 6-12 sn. olarak belirtmiştir. EFNARC (2005)'te ise değişik yapılarda farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceğini belirterek viskozite için 2 farklı (VF1, VF2) sınıflandırma yöntemine gidilmiştir. Çizelge 4.6'da viskozite sınıfları verilmiştir.

**Çizelge 4.6.** V-hunisi akış süresine göre belirlenen viskozite sınıfları

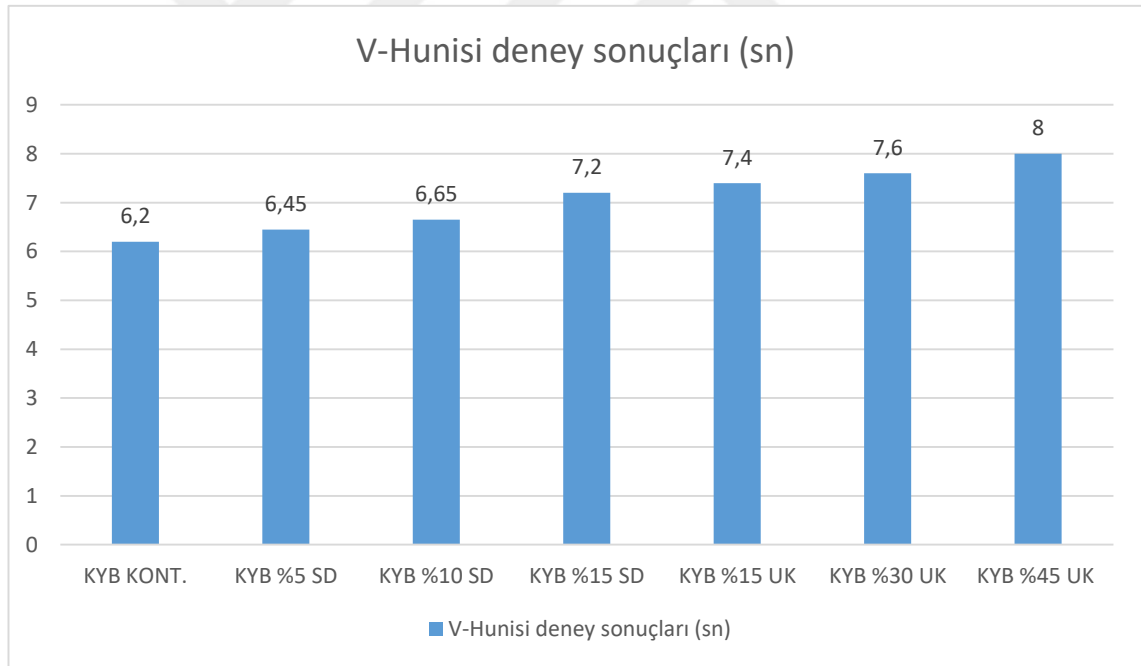
| V-hunisi (t) | Beton Viskozite Sınıfı |
|--------------|------------------------|
| $\leq 8$ sn  | VF1                    |
| 9-25 sn      | VF2                    |

EFNARC (2002) standardına uyumlu 10 litre kapasiteye sahip V şeklindeki huni kullanılarak tüm seriler için yapılan deneyde V-hunisi akış süresi tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar Çizelge 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** V-hunisi deney sonuçları

| Numune Grubu | t (sn) | EFNARC'a göre viskozite sınıfı |
|--------------|--------|--------------------------------|
| KYB KONT.    | 6,20   | VF1                            |
| KYB %5 SD    | 6,45   | VF1                            |
| KYB %10 SD   | 6,65   | VF1                            |
| KYB %15 SD   | 7,20   | VF1                            |
| KYB %15 UK   | 7,40   | VF1                            |
| KYB %30 UK   | 7,60   | VF1                            |
| KYB %45 UK   | 8,00   | VF1                            |

Tüm gruplardan elde edilen sonuçlar EFNARC (2002)'de belirtilen 6-12 sn. akış süresi sınır değerleri arasında kalmıştır. En düşük akış süresi 6,20 sn. akış süresi ile KYB KONTROL grubunda gerçekleşirken, KYB %45 UK katkılı grup 8,00 sn. akış süresiyle en yüksek değere ulaşmıştır. KYB kontrol betonuna göre %5 SD, %10 SD ve %15 SD katkılı numuneler sırasıyla %4, %7 ve %16 oranında bir artış olurken, %15 UK, %30 UK ve %45 UK katkılı numuneler de sırasıyla %19, %23 ve %29 oranında bir artış olmuştur. Deney sonuçlarına göre elde edilen sonuçlarda gösteriyor ki tüm karışımlar için bloklanma riski olmadığı söylenebilir. EFNARC (2005)'te belirtilen akış süreleri dikkate alındığında ise tüm grupta ki numunelerin VF1 sınıfında yer aldığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.3'de tüm numune gruplarına ait V-hunisi deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.3.** V-hunisi deney sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılan V-hunisi deneyinde üretilen beton serilerinin viskozite dirençleri arasında karşılaştırma yapabilmek için V-hunisi geçiş süreleri ölçülmüştür. KYB betonlarda UK ve SD viskoziteyi artırmıştır. Bu durumu  $T_{50}$  sürelerinde ki durumda doğrulamaktadır.

%5 SD ikame oranında 6,45 s değeri elde edilirken; %10 SD ikame oranında 6,65 s, %15 SD ikame oranında ise 7,20 s değerleri elde edilmiştir. Ayrıca %15 UK ikame oranında 7,40 s; %30 UK ikame oranında 7,60 s ve %45 UK ikame oranında 8,00 s değerleri elde edilmiştir. Bu durum hem UK'nın hem de SD'nin viskoziteyi artırma noktasında etkili bir malzeme olduğu söylenebilir.

Tohumcu vd (2013) yaptıkları çalışmada %5, %10, %15 SD ve %25, %40, %55 UK ikame oranına sahip karışımlarda V-hunisi akış süreleri yönünden kontrol betonuna göre daha fazla akış süreleri ölçülmüştür. Benzer şekilde UK katkılı betonların SD katkılı betonlara göre daha fazla akış süresi özelliği göstermiştir.

#### 4.1.5. L- Kutusu deneyi

Taze halde bulunan KYB'nin doldurma yeteneğinin, ayrılmaya karşı direncinin ve geçiş yeteneğinin L şeklinde ki bir kutu kullanılarak tespit edildiği deneyde, L kutusu ucunda ki beton yüksekliği ( $H_2$ ) ve kapağın hemen önünde ki beton yüksekliği ( $H_1$ ) ölçülür. Ölçülen bu değerlerle L kutusu bloklanma oranı ( $H_2/H_1$ ) hesaplanır. Bu oran, betonun KYB özelliğine sahip olup olmadığı hakkında bilgi verir.

EFNARC (2002)'de L kutusu bloklanma oranının ( $H_2/H_1$ ) 0,8-1,0 değerinde olması istenmektedir. EFNARC (2005)'te ise değişik yapı elemanlarında farklı özelliklere sahip KYB'ler kullanılabileceği belirtilerek geçiş yeteneği için L kutusunda bulunan donatı sayısına bağlı olarak 2 farklı (PA1, PA2) sınıflandırma yöntemine gidilmiştir. Çizelge 4.8'de L kutusu deneyine göre geçiş yeteneği sınıfları verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** L-Kutusu geçiş yeteneğine göre viskozite sınıfları (EFNARC 2005)

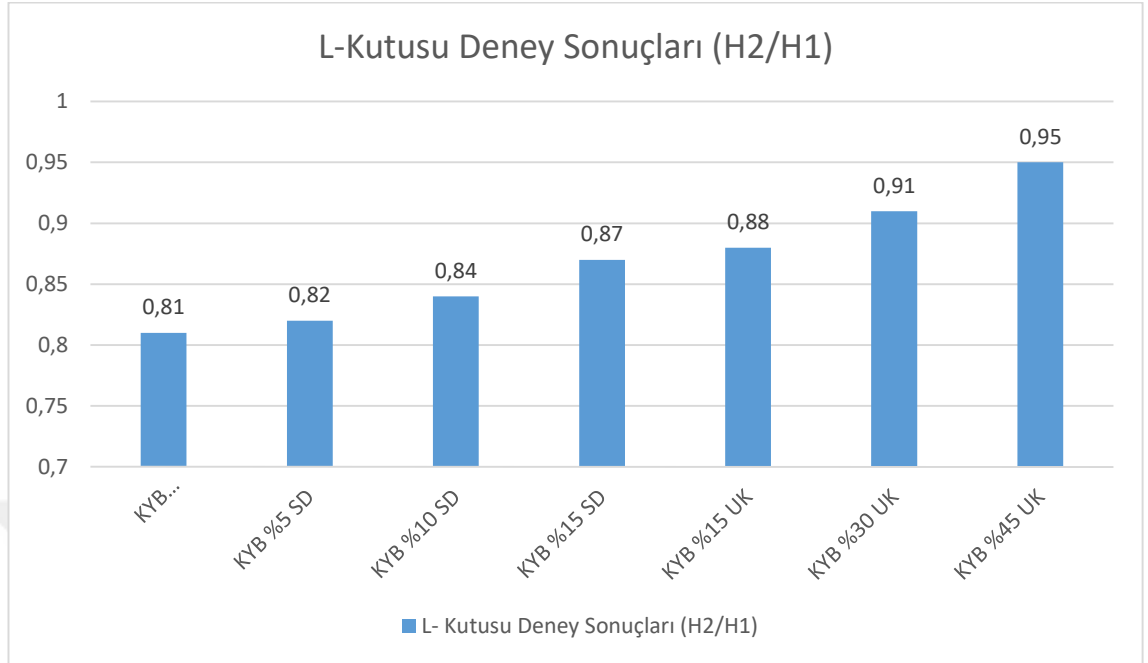
| L-kutusu ( $H_2/H_1$ )               | Geçme Yeteneği Sınıfı |
|--------------------------------------|-----------------------|
| $(H_2/H_1) \geq 0,80$ ile 2 donatılı | PA1                   |
| $(H_2/H_1) \geq 0,80$ ile 3 donatılı | PA2                   |

EFNARC (2002) standardına uygun olarak yapılan deneyde, betonun donatılar arasından geçerek L kutusu ucundaki beton yüksekliği ( $H_2$ ) ile kapağın önündeki beton yüksekliği ( $H_1$ ) belirlenmiştir. L kutusu bloklanma oranı ( $H_2/H_1$ ) hesaplanarak, elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9’da verilmiştir.

**Çizelge 4.9.** L- kutusu deney sonuçları

| Numune Grubu | $H_1$ (cm) | $H_2$ (cm) | $(H_2/H_1)$ | EFNARC’a göre geçme yeteneği sınıfı |
|--------------|------------|------------|-------------|-------------------------------------|
| KYB KONT.    | 7,41       | 6,00       | 0,81        | PA2                                 |
| KYB %5 SD    | 8,90       | 7,30       | 0,82        | PA2                                 |
| KYB %10 SD   | 8,60       | 7,23       | 0,84        | PA2                                 |
| KYB %15 SD   | 7,20       | 6,27       | 0,87        | PA2                                 |
| KYB %15 UK   | 8,40       | 7,40       | 0,88        | PA2                                 |
| KYB %30 UK   | 8,90       | 8,10       | 0,91        | PA2                                 |
| KYB %45 UK   | 8,70       | 8,27       | 0,95        | PA2                                 |

Bütün grup numunelerde  $H_2/H_1$  oranı, EFNARC 2002 ve 2005’te belirtilen 0,80 – 1,00 sınır değerleri arasında kalmıştır. En düşük  $H_2/H_1$  oranı 0,81 değeri ile KYB Kontrol grubu olurken en yüksek  $H_2/H_1$  oranı ise 0,95 ile KYB %45 UK olmuştur. KYB kontrol betonuna göre %5 SD, %10 SD ve %15 SD katkılı numunelerde sırasıyla %1, %4 ve %7 arasında bir artış olurken, UK katkılı numunelerde sırasıyla %9, %12 ve %17 arasında bir artış olmuştur. Çalışmada 3 donatı engelli deney aleti kullanıldığından dolayı üretilen bütün grup numuneler EFNARC 2005’e göre PA2 sınıfındadırlar. Şekil 4.4’de tüm numune gruplarına ait L-kutusu deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.4.** L-kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması

KYB %5 SD ikame oranında 0,82 değeri elde edilirken; %10 SD ikame oranında 0,84, %15 SD ikame oranında 0,87 değeri elde edilmiştir. Ayrıca KYB %15 UK ikame oranında 0,88 değeri elde edilirken %30 UK ikame oranında 0,91 ve %45 UK ikame oranında 0,95 değeri elde edilmiştir. Bu durumda UK ve SD kullanılarak üretilen KYB'nin donatılar arasından geçiş yeteneğinin kontrol betonuna göre daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Ancak UK'nın SD'ye göre donatılar arası geçiş yeteneğinin daha iyi olduğu söylenebilir. UK oranı arttıkça geçiş yeteneğide artmaktadır. Aynı şekilde SD kendi içerisinde değerlendirilecek olursa SD arttıkça da geçiş yeteneği artacaktır.

Tohumcu vd (2013) yaptıkları çalışmada kontrol betonuna göre SD katkılı numunelerin %2 ile %4 arasında bir artış gözlemlenirken UK katkılı numunelerde bu artış %2 ile %8 arasında gözlemlenmiştir.

#### 4.1.6. U- Kutusu deneyi

Taze halde bulunan KYB'nin kendi ağırlığı altında yerleşme yeteneğinin tespit edilebilmesi için yapılan deneydir. Deney numunenin özel bir kutu içerisine konularak kendi ağırlığı ile yükselmesinin gözlemlenmesini kapsar. U kutusunun iki kol tarafında bulunan taze betonların arasındaki yükseklik farkının ölçülmesi sonucu üretilen betonun KYB özelliği taşıyıp taşımadığına karar verilir.

EFNARC (2002)'de U kutusunun iki kolunda bulunan taze halde ki betonlar arasındaki yükseklik farkı ( $\Delta h$ ) 0-3 cm değerleri arasında olması istenmektedir.

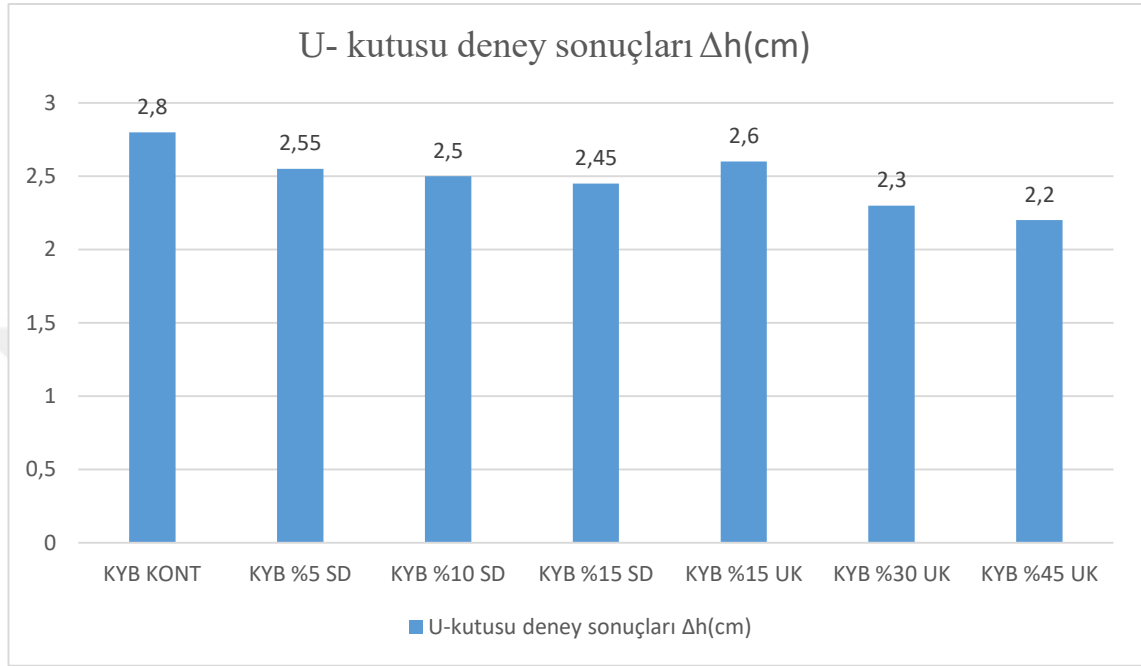
EFNARC (2002) standardına uygun şekilde yapılan bu deneyde, betonun U kutusunun alt bölümünde bulunan donatılar arasından geçerek diğer bölüme yükselmesinden sonra kutunun her iki kolunda bulunan taze beton arasındaki yükseklik farkı ölçülmüştür. Deney sonucunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.10.** U-kutusu deney sonuçları

| Numune Grubu | $\Delta h$ (cm) |
|--------------|-----------------|
| KYB KONT.    | 2,80            |
| KYB %5 SD    | 2,55            |
| KYB %10 SD   | 2,50            |
| KYB %15 SD   | 2,45            |
| KYB %15 UK   | 2,60            |
| KYB %30 UK   | 2,30            |
| KYB %45 UK   | 2,20            |

Çalışmada üretilen tüm grup numunelerde elde edilen sonuçlar neticesinde EFNARC 2002'de belirtilen  $\Delta h_{\max} = 3,00$  cm sınır değerini aşmamıştır. En yüksek değer  $\Delta h_{\max} = 2,80$  ile KYB Kontrol grubu olurken, en düşük değer  $\Delta h_{\min} = 2,20$  ile KYB %45 UK olmuştur. KYB kontrol betonuna göre %5 SD, %10 SD ve %15 SD katkılı numunelerde sırasıyla %9, %11 ve %13; %15 UK, %30 UK ve %45 UK katkılı numunelerde

sırasıyla %8, %18 ve %22 azalma tespit edilmiştir. Şekil 4.5’de tüm numune gruplarına ait U-kutusu deney sonuçları karşılaştırılmıştır.



**Şekil 4.5.** U-kutusu deney sonuçlarının karşılaştırılması

%5 SD ikame oranında 2.55 cm, %10 SD ikame oranında 2.50 cm ve %15 SD ikame oranında 2.45 cm değerleri elde edilmiştir. Aynı şekilde %15 UK ikame oranında 2.60 cm, %30 UK ikame oranında 2.30 cm ve %45 UK ikame oranında 2.20 cm değerleri ölçülmüştür. Bu durumda UK ve SD’nin donatılar arasından geçiş yeteneğini artırdığını ve oranlar arttıkça geçiş yeteneğinin de arttığını söyleyebiliriz. Tohumcu vd (2013) yaptıkları çalışmada kontrol betonuna göre SD katkılı numunelerin %9 ile %13 arasında, UK katkılı numunelerde ise %8 ile %22 arasında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir.

#### 4.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Taze beton deneyleri tamamlandıktan sonra her bir grup için 6 adet 15x15x15 cm boyutlarında küp, 6 adet 7x7x28 cm boyutlarında prizma ve 4 adet 10 cm çapında ve 20

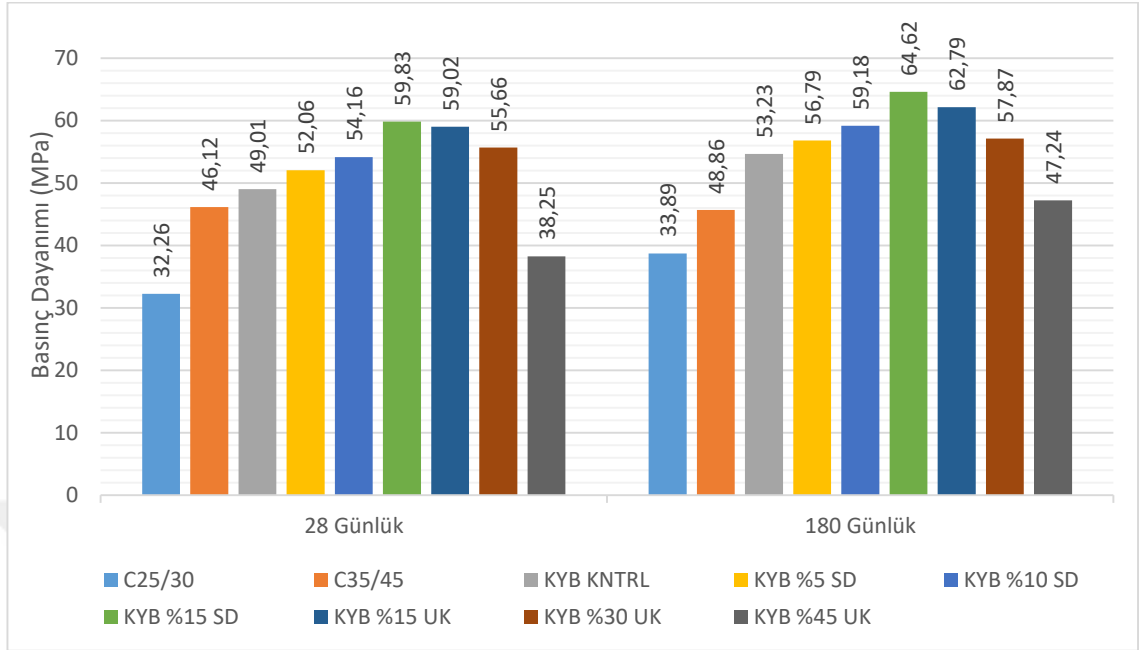
cm yüksekliğinde silindir numune hazırlanarak toplam 144 adet numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Tüm gruplardaki numuneler beton türüne ve kullanılan mineral katkı madde miktarına göre isimlendirilmişlerdir.

#### 4.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

Yapılan deney 15x15x15 cm ebatlarında küp numuneler 28. ve 180. günde kürden çıkarılarak deneye tabi tutulmuşlardır. Elde edilen deney sonuçları alınan 3 numunenin ortalaması olarak verilmiştir. 28 ve 180 günlük basınç dayanım deney sonuçları Çizelge 4.11 ve Şekil 4.6'da sunulmuştur.

**Çizelge 4.11.** 28 ve 180 günlük basınç dayanım sonuçları

| Numune Grubu | 28 Günlük basınç dayanım değerleri (MPa) | 180 Günlük basınç dayanım değerleri (MPa) | 28 ve 180 günlük basınç dayanım farkları % |
|--------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| C25/30       | 32,26                                    | 33,89                                     | % 5                                        |
| C35/45       | 46,12                                    | 48,86                                     | % 6                                        |
| KYB KNTRL    | 49,01                                    | 53,23                                     | % 9                                        |
| KYB %5 SD    | 52,06                                    | 56,79                                     | % 9                                        |
| KYB %10 SD   | 54,16                                    | 59,18                                     | % 10                                       |
| KYB %15 SD   | 59,83                                    | 64,62                                     | % 8                                        |
| KYB %15 UK   | 59,02                                    | 62,79                                     | % 7                                        |
| KYB %30 UK   | 55,66                                    | 57,87                                     | % 4                                        |
| KYB %45 UK   | 38,35                                    | 47,24                                     | % 23                                       |



**Şekil 4.6.** 28 ve 180 Günlük basınç dayanım sonuçlarının karşılaştırılması

C25/30, C35/45, KYB kontrol betonu ile %5, %10 ve %15 oranlarında SD ve %15, %30 ve %45 oranlarında UK'nın çimentonun yerine kullanılmasıyla üretilen KYB'lerin 28 ve 180 günlük basınç dayanım sonuçlarının ortalamaları Çizelge 4.11 ve Şekil 4.6'da verilmiştir.

Şekil 4.6 incelendiğinde 28 günlük ve 180 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre %5, %10, %15 SD ile %15, %30 UK katkılı KYB kontrol betonuna göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Ancak %45 UK katkılı KYB için bu söylenemez. %45 UK katkılı betonların basınç dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Silis dumanı katkılı KYB numunelerinin 28 günlük basınç dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında %5 SD katkılı KYB'ler de %6, %10 SD katkılı KYB'ler de %11, %15 SD katkılı KYB'ler de ise %22 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 180 günlük basınç dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında ise %5 SD katkılı KYB'ler de %7, %10 SD katkılı KYB'ler de %11, %15 SD katkılı KYB'ler de %21 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Uçucu kül katkılı KYB numunelerinin 28 günlük basınç dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında %15 UK katkılı KYB'ler de %20, %30 UK katkılı KYB'ler de %13 oranında bir artış olmuştur. Ancak %45 UK katkılı KYB'ler de ise %22 oranında dayanımda bir düşüş olmuştur. 180 günlük basınç dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında ise %15 UK katkılı KYB'ler de %18, %30 UK katkılı KYB'ler de %9 oranında bir artış sağladığı, %45 UK katkılı KYB'ler de ise dayanımda %12 oranında bir düşüşe neden olduğu görülmüştür.

Aynı S/Ç oranına SD ve UK içeren KYB'nin basınç dayanımının kontrol betonuna göre yüksek olmasında puzolanların etkisi aşikârdır. Puzolan malzemelerin de tanımından anlaşılacağı üzere kendi başlarına bağlayıcılık özellikleri olmamasına rağmen ince taneleri olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği olan malzeme türleridir. Kalsiyum hidroksitin portland çimentosunun ana bileşenleri olan  $C_2S$  ve  $C_3S$ 'nin hidrasyonu neticesinde ortamda olduğu göz önünde bulundurularak SD ve UK bağlayıcılık özelliği kazandığını söyleyebiliriz. Kalsiyum hidroksit dayanım açısından düşük bir malzemedir. Agregâ – çimento ara yüzey bölgesine yığılan kalsiyum hidroksit bu bölgeyi zayıf hale getirir. SD ve UK gibi puzolanik katkıları kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum – silika – hidrate bağlayıcı jellerini meydana getirirler. Bu sayede agregâ – çimento ara yüzey bölgesini güçlendirirler. SD ve UK'nın kullanılması nedeniyle ara yüzeyi güçlenen KYB'nin basınç dayanımları kontrol betonlarına göre daha yüksek olmaktadır. Ancak SD ve UK'nın belli oranlardan fazla kullanılması da dayanımı düşürdüğü yapılan araştırmalar da gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise SD ve UK'nın hacimce ince malzeme miktarını artırması nedeniyle betonun kompazitesinin de arttığı ve basınç dayanımında azalmalara neden olduğu söylenebilir.

Demir (2009) yapmış olduğu deneysel çalışmasında UK ve SD katkılarının %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ağırlıkça çimentonun yerine ikame edilerek ürettikleri beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım özelliklerini incelemiştir. Basınç dayanım sonuçları kontrol betonu ile kıyaslandığında; 7 günlük basınç dayanım sonuçlarında %3 ile %17 arasında, 28 günlük basınç dayanım sonuçlarında %15 ile %20

arasında, 90 günlük basınç dayanım sonuçlarında ise %5 ile %22 arasında SD katkılı numunelerin artış gösterdiği görülmüştür. UK katkılı numunelerde ise 7 günlük basınç dayanım sonuçlarında %4 ile %21 arasında azalma, 28 günlük basınç dayanım sonuçlarında ise %5 ile %20 UK katılarak üretilen beton numunelerde %2 - %6 arasında artış meydana geldiği görülürken %25 UK katılarak üretilen beton numunesinde ise %3 oranında azalma olduğu deney sonuçlarına göre gözlemlenmiştir. 90 günlük deney sonuçları incelendiğinde %2 - %8 arasında artış olduğu görülmüştür. Türk vd (2010) %25, %30, %35, %40 UK ve %5, %10, %15 ve %20 SD kullanarak ürettikleri KYB betonun 28 günlük basınç dayanımını incelemişlerdir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler incelendiğinde %25 UK kullanılan KYB'nin basınç dayanım sonucu diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında %30 UK kullanılarak üretilen KYB'de %9, %35 UK kullanılarak üretilen KYB'de %14 ve %40 UK kullanılarak üretilen KYB'de %9 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. %5 SD kullanılarak üretilen KYB'nin basınç dayanım sonucu diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında %10 SD kullanılarak üretilen KYB'de %8, %15 SD kullanılarak üretilen KYB'de %17 ve %20 SD kullanılarak üretilen KYB'de %14 oranında artış olduğu verilen değerlere göre söylenebilir.

Yukarıda verilen çalışmaların ve diğer literatür araştırmalarının sonuçlarına göre 28. gün ve daha ileri ki yaşlarda UK ve SD'nin ağırlıkça çimentonun yerine belirli oranlarda ikame edilmesiyle dayanımın arttığı görülmüştür. Dayanımda oluşan artış 28. günde kontrol betonuna göre fazla olmasa da ilerleyen yaşlarda bu farkın arttığı belirlenmiştir. Hatta SD'nin UK'ya göre daha erken yaşlarda dayanımı olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir. SD ve UK'nın akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri ile birlikte kullanılması ile su ihtiyacı azalmakta, bağlayıcı madde içeriği artmakta ve puzolanik aktivite yoluyla dayanımın artmasına katkı bulundukları söylenebilir. KYB'nin basınç dayanımları normal betonda olduğu gibi bileşen malzemelerinin seçimi ve oranlamasıyla ayarlanır. Bundan dolayı KYB'ler geleneksel betonlarla karşılaştırıldıklarında basınç dayanımları bakımından büyük bir farkın olmadığı belirtilse de, KYB üretiminde vibrasyon uygulaması olmadığından ve akıcılığı yüksek olduğundan dolayı geleneksel betona göre kalıba daha boşluksuz olarak yerleşerek

agrega-çimento ara yüzü daha yoğun ve dayanıklılığa sahiptir. Bundan dolayı KYB'lerin basınç dayanımları geleneksel betona göre daha yüksek olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür.

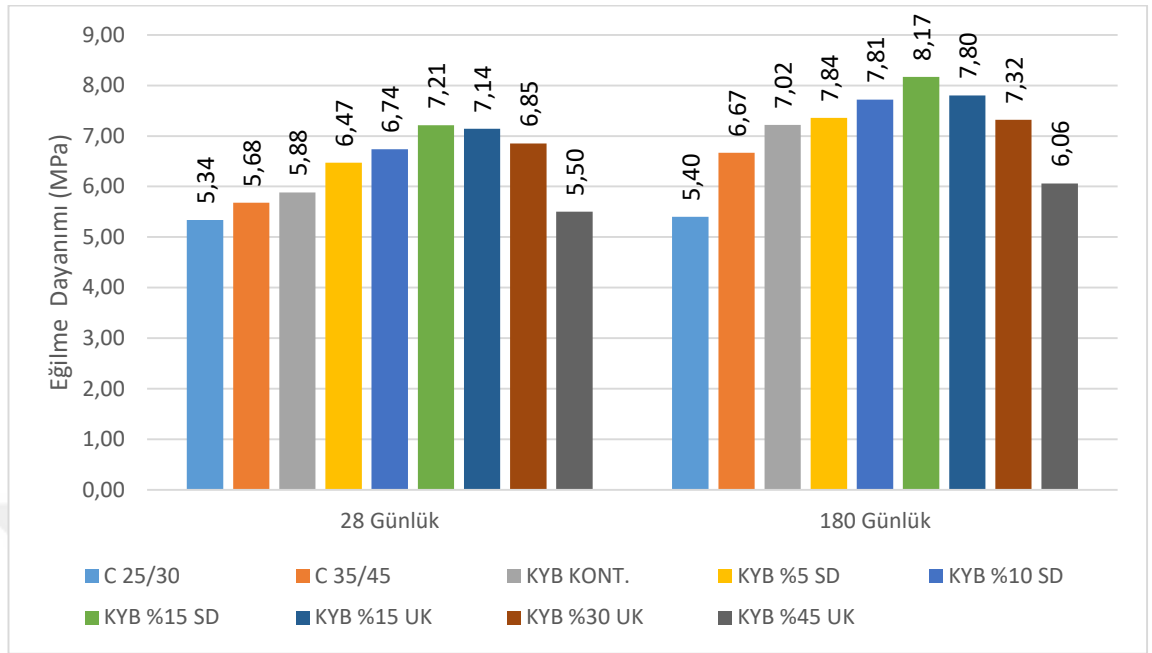
Silis dumanı ve uçucu külün beton basınç dayanımına olumlu yöndeki etkisi C-S-H jelleri oluşturmalarına bağlanır. Ayrıca silis dumanı tanelerinin çimento tanelerinden daha ince olmasından dolayı agrege-hamur ara yüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirdiğinden ötürü uçucu küle göre beton dayanımını daha da artırır.

#### 4.2.2. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Yapılan deney 7x7x28 cm ebatlarında kiriş numuneler üzerinde üçte bir noktalarından yüklenmiş basit kiriş deney yöntemi ile yapılmıştır. Deney numuneleri 28. ve 180. günde deneye tabi tutulmuşlardır. C25/30, C35/45, KYB kontrol betonu ile %5, %10 ve %15 oranlarında SD ve %15, %30 ve %45 oranlarında UK'nın çimentonun yerine kullanılmasıyla üretilen KYB'lerin 28 ve 180 günlük eğilme dayanım sonuçlarının ortalamaları Çizelge 4.12 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

**Çizelge 4.12.** 28 ve 180 Günlük eğilme dayanım sonuçları

| Numune Grubu | 28 Günlük eğilme dayanım değerleri (MPa) | 180 Günlük eğilme dayanım değerleri (MPa) | 28 ve 180 günlük eğilme dayanım farkları % |
|--------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| C25/30       | 5,34                                     | 5,40                                      | %1                                         |
| C35/45       | 5,68                                     | 6,67                                      | %17                                        |
| KYB KNTRL    | 5,88                                     | 7,02                                      | %19                                        |
| KYB %5 SD    | 6,47                                     | 7,84                                      | %21                                        |
| KYB %10 SD   | 6,74                                     | 7,81                                      | %16                                        |
| KYB %15 SD   | 7,21                                     | 8,17                                      | %14                                        |
| KYB %15 UK   | 7,14                                     | 7,80                                      | %9                                         |
| KYB %30 UK   | 6,85                                     | 7,32                                      | %7                                         |
| KYB %45 UK   | 5,50                                     | 6,06                                      | %10                                        |



**Şekil 4.7.** 28 ve 180 Günlük prizma numunelerin eğilme dayanımları

Şekil 4.7 incelendiğinde 28 günlük ve 180 günlük eğilme dayanım sonuçlarına göre %5, %10, %15 silis dumanı ile %15, %30 uçucu kül katkılı KYB betonlarının kontrol betonuna göre daha yüksek dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Ancak %45 UK katkılı KYB için bu söylenemez. %45 UK katkılı betonların eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir.

Silis dumanı katkılı KYB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında %5 SD katkılı KYB'ler de %10, %10 SD katkılı KYB'ler de %15, %15 SD katkılı KYB'ler de ise %23 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. 180 günlük eğilme dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında ise %5 SD katkılı KYB'ler de %12, %10 SD katkılı KYB'ler de %12, %15 SD katkılı KYB'ler de %16 oranında bir artış olduğu görülmüştür.

Uçucu kül katkılı KYB numunelerinin 28 günlük eğilme dayanım sonuçları KYB kontrol betonu ile karşılaştırıldığında %15 UK katkılı KYB'ler de %21, %30 UK katkılı KYB'ler de %16 oranında bir artış olmuştur. Ancak %45 UK katkılı KYB'ler de ise %7 oranında dayanımda bir düşüş olmuştur. 180 günlük eğilme dayanım sonuçları KYB

kontrol betonu ile karşılaştırıldığında ise %15 UK katkılı KYB'ler de %11, %30 UK katkılı KYB'ler de %5 oranında bir artış sağladığı, %45 UK katkılı KYB'ler de ise dayanımında %14 oranında bir düşüşe neden olduğu görülmüştür.

Yapılan araştırmalar ve deneylerden elde edilen sonuçlara göre basınç dayanımı yüksek olan betonların çekme dayanımının da yüksek olduğunu söyleyebiliriz. Kullanılan UK ve SD miktarının optimum seviyeye kadar artırılması yada süperakışkanlaştırıcı ile kullanılması eğilme – basınç dayanımları arasında ki orantısının katkısız betondakilere göre daha küçük olmasına yol açtığı literatürde ifade edilmiştir. Eğilme dayanımı ile ilgili yapılan deneyler ve araştırmalar gösteriyor ki basınç dayanımı ve eğilme dayanımı paralel özellik göstermektedir. Basınç dayanımında artışa neden olan S/Ç oranının azalması, beton içerisinde ki malzemelerin homojen dağılması ve kullanılan SD ve UK puzolan katkılarının reaktivitesi ve çimento-agrega ara yüzeyini güçlendirmesi vb. nedenler eğilme dayanımı için de söylenebilir. Ayrıca yapılan çalışmalarda geleneksel beton ile aynı basınç dayanımına sahip KYB karşılaştırıldığında eğilme dayanımı bakımından KYB'nin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bunun nedeni olarak da KYB'de ki boşluk yapısının daha homojen dağılmış olması ve vibrasyondan kaynaklanan mikro yapı kusurlarının olmamasıdır.

Demir (2009) yapmış olduğu deneysel çalışmasında UK ve SD katkılarının %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ağırlıkça çimentonun yerine ikame edilerek ürettikleri beton numunelerin 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanım özelliklerini incelemiştir. Eğilme dayanım sonuçları kontrol betonu ile kıyaslandığında; 7 günlük eğilme dayanım sonuçlarında %11 ile %38 arasında, 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarında %2 ile %27 arasında, 90 günlük eğilme dayanım sonuçlarında ise %3 ile %22 arasında SD katkılı numunelerin artış gösterdiği görülmüştür. UK katkılı numunelerde ise 7 günlük basınç dayanım sonuçlarında %1 ile %33 arasında azalma, 28 günlük eğilme dayanım sonuçlarında ise %5 ile %20 UK katılarak üretilen beton numunelerde %4 - %17 arasında artış meydana geldiği görülürken %25 UK katılarak üretilen beton numunesin de ise %3 oranında azalma olduğu deney sonuçlarına göre gözlemlenmiştir. 90 günlük deney sonuçları incelendiğinde %3 - %8 arasında artış olduğu görülmüştür. Türk vd

(2010) %25, %30, %35, %40 UK ve %5, %10, %15 ve %20 SD kullanarak ürettikleri KYB betonun 28 günlük eğilme dayanımını incelemişlerdir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler incelendiğinde %25 UK kullanılan KYB'nin eğilme dayanım sonucu diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında %30 UK kullanılarak üretilen KYB'de %14, %35 UK kullanılarak üretilen KYB'de %12 oranında artış sağlanmış olup %40 UK kullanılarak üretilen KYB'de %3 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür. %5 SD kullanılarak üretilen KYB'nin eğilme dayanım sonucu diğer katkı oranlarıyla karşılaştırıldığında %10 SD kullanılarak üretilen KYB'de %15, %15 SD kullanılarak üretilen KYB'de %12 ve %20 SD kullanılarak üretilen KYB'de %8 oranında artış olduğu verilen değerlere göre söylenebilir.

#### 4.2.3. Hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonuçları

Yapılan deney 10 cm çapında ve 5 cm yüksekliğinde silindir numunelerin 180. gün sonunda kürden çıkarılarak ASTM C 1202 standardına uygun olarak bölüm 3.2.5'de yer verildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. 3 farklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerin sonuçları Çizelge 4.13, Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'de verilmiştir. Deneylerin sonuçlarına göre elde edilen deney ortalamaları ise Çizelge 4.16 ve Şekil 4.8'de sunulmuştur.

**Çizelge 4.13.** 1. Numunelerin deney sonuçları

| 180 Günlük hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonuçları (coulomb) |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KOD                                                                 | 0   | 30  | 60  | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  | 330  | 360  |
| C25/30                                                              | 156 | 523 | 948 | 1416 | 1927 | 2482 | 3061 | 3663 | 4285 | 4941 | 5621 | 6319 | 6669 |
| C35/45                                                              | 111 | 475 | 817 | 1184 | 1576 | 1998 | 2440 | 2820 | 3240 | 3636 | 3962 | 4346 | 4968 |
| KYB KNTRL                                                           | 100 | 304 | 520 | 743  | 981  | 1218 | 1459 | 1708 | 1956 | 2212 | 2482 | 2748 | 2885 |
| KYB %5 SD                                                           | 61  | 183 | 309 | 439  | 576  | 716  | 860  | 1008 | 1159 | 1310 | 1468 | 1627 | 1706 |
| KYB %10 SD                                                          | 27  | 104 | 208 | 302  | 396  | 493  | 594  | 694  | 799  | 907  | 1015 | 1078 | 1184 |
| KYB %15 SD                                                          | 12  | 37  | 63  | 88   | 113  | 138  | 163  | 189  | 210  | 232  | 253  | 274  | 289  |
| KYB %15 UK                                                          | 18  | 54  | 90  | 126  | 162  | 198  | 234  | 270  | 306  | 342  | 378  | 402  | 432  |
| KYB %30 UK                                                          | 14  | 43  | 72  | 100  | 129  | 158  | 187  | 216  | 244  | 273  | 302  | 324  | 345  |
| KYB %45 UK                                                          | 12  | 37  | 56  | 75   | 109  | 135  | 154  | 189  | 214  | 239  | 264  | 286  | 302  |

**Çizelge 4.14. 2. Numunelerin deney sonuçları**

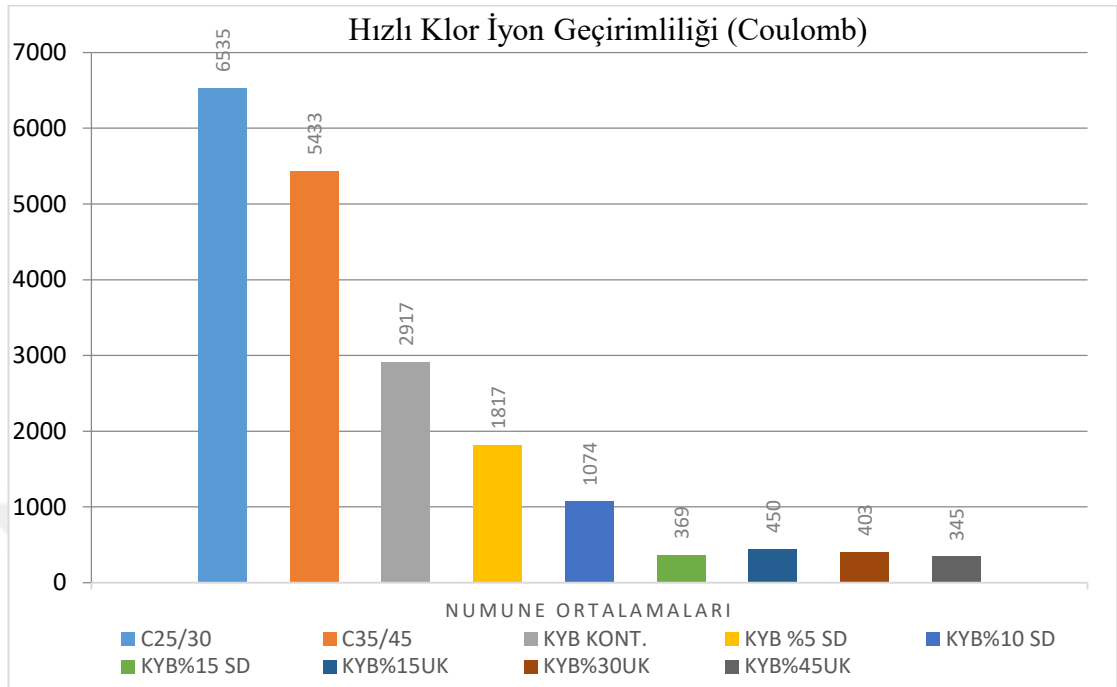
| 180 Günlük hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonuçları (coulomb) |     |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KOD                                                                 | 0   | 30  | 60  | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  | 330  | 360  |
| C25/30                                                              | 104 | 385 | 709 | 1062 | 1458 | 1882 | 2339 | 2786 | 3236 | 3690 | 4118 | 4336 | 4716 |
| C35/45                                                              | 90  | 331 | 594 | 878  | 1188 | 1519 | 1864 | 2232 | 2624 | 3031 | 3445 | 3865 | 4105 |
| KYB KNTRL                                                           | 95  | 304 | 534 | 783  | 1049 | 1330 | 1625 | 1931 | 2248 | 2575 | 2907 | 3184 | 3516 |
| KYB %5 SD                                                           | 54  | 169 | 288 | 410  | 536  | 669  | 806  | 946  | 1090 | 1238 | 1389 | 1540 | 1616 |
| KYB %10 SD                                                          | 34  | 109 | 185 | 261  | 336  | 412  | 491  | 570  | 649  | 729  | 808  | 891  | 932  |
| KYB %15 SD                                                          | 14  | 43  | 72  | 100  | 129  | 158  | 187  | 216  | 241  | 270  | 298  | 327  | 342  |
| KYB %15 UK                                                          | 16  | 48  | 84  | 120  | 156  | 192  | 228  | 253  | 297  | 324  | 361  | 441  | 465  |
| KYB %30 UK                                                          | 13  | 32  | 67  | 91   | 128  | 167  | 209  | 235  | 289  | 319  | 357  | 395  | 438  |
| KYB %45 UK                                                          | 9   | 34  | 59  | 88   | 117  | 145  | 181  | 217  | 253  | 289  | 322  | 354  | 370  |

**Çizelge 4.15. 3. Numunelerin deney sonuçları**

| 180 Günlük hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonuçları (coulomb) |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| KOD                                                                 | 0   | 30  | 60   | 90   | 120  | 150  | 180  | 210  | 240  | 270  | 300  | 330  | 360  |
| C25/30                                                              | 167 | 585 | 1063 | 1593 | 2197 | 2842 | 3544 | 4303 | 5106 | 5941 | 6809 | 7234 | 8218 |
| C35/45                                                              | 217 | 700 | 1211 | 1744 | 2302 | 2878 | 3468 | 4080 | 4721 | 5391 | 6096 | 6478 | 7225 |
| KYB KNTRL                                                           | 70  | 228 | 394  | 577  | 768  | 966  | 1171 | 1380 | 1589 | 1801 | 2021 | 2241 | 2350 |
| KYB %5 SD                                                           | 77  | 239 | 405  | 577  | 750  | 927  | 1107 | 1290 | 1474 | 1657 | 1845 | 2014 | 2129 |
| KYB %10 SD                                                          | 28  | 115 | 205  | 295  | 388  | 482  | 579  | 676  | 774  | 871  | 964  | 1037 | 1105 |
| KYB %15 SD                                                          | 14  | 37  | 84   | 138  | 178  | 217  | 257  | 297  | 336  | 376  | 415  | 455  | 475  |
| KYB %15 UK                                                          | 19  | 59  | 99   | 135  | 171  | 207  | 243  | 282  | 322  | 361  | 397  | 417  | 451  |
| KYB %30 UK                                                          | 16  | 48  | 84   | 120  | 156  | 192  | 228  | 264  | 300  | 336  | 372  | 406  | 426  |
| KYB %45 UK                                                          | 12  | 43  | 75   | 104  | 133  | 162  | 194  | 226  | 259  | 291  | 320  | 342  | 363  |

**Çizelge 4.16. Deney ortalamaları**

| NUMUNE     | 180 Günlük hızlı klor iyon geçirimsizliği deney sonuçları (coulomb) | Geçen elektriksel yük miktarı (coloumb)                                                                 | Klor iyon geçirimsizliği yönünden değerlendirme |
|------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| C25/30     | 6535                                                                | >4000 Yüksek<br>2000 – 4000 Orta<br>1000 – 2000 Düşük<br>100 – 1000 Çok Düşük<br>< 100 İhmal Edilebilir | Yüksek                                          |
| C35/45     | 5433                                                                |                                                                                                         | Yüksek                                          |
| KYB KNTRL  | 2917                                                                |                                                                                                         | Orta                                            |
| KYB %5 SD  | 1817                                                                |                                                                                                         | Düşük                                           |
| KYB %10 SD | 1074                                                                |                                                                                                         | Düşük                                           |
| KYB %15 SD | 369                                                                 |                                                                                                         | Çok Düşük                                       |
| KYB %15 UK | 450                                                                 |                                                                                                         | Çok Düşük                                       |
| KYB %30 UK | 403                                                                 |                                                                                                         | Çok Düşük                                       |
| KYB %45 UK | 345                                                                 |                                                                                                         | Çok Düşük                                       |



**Şekil 4.8.** Hızlı klor iyon geçirirmliliği değerlerinin karşılaştırılması

C25/30, C35/45 geleneksel beton ile KYB kontrol, %5, %10 ve %15 oranlarında SD, %15, %30 ve %45 oranlarında UK kullanılarak üretilen KYB'lerin 180 günlük hızlı klor iyon geçirirmliliği deneyleri sonucunda elde edilen ortalama değerler Şekil 4.8'de verilmiştir. 180 günlük hızlı klor iyon geçirirmliliği deneyi sonucunda geleneksel betonların yüksek geçirirmliliğe, kontrol numunesinin orta derecede geçirirmliliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Kontrol betonuna göre geçirirmlilik oranları karşılaştırıldığında %5 SD'de %38, %10 SD'de %63 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür ve bu KYB'lerin geçirirmliliğinin düşük olduğu, %15 SD'de %87 azalma meydana gelerek bu KYB'lerin ise çok düşük geçirirmliliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca %15 UK'da %85, %30 UK'da %86 ve %45 UK'da ise %88 oranında azalma görülmüştür. Elde edilen değerlerden yola çıkarak UK kullanılarak üretilen KYB'lerin çok düşük geçirirmliliğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bunlar içerisinde %15 SD ve %30 UK kullanılarak üretilen KYB'ler en iyi sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

SD ve UK katkılarının betonda ki boşluk miktarını azalttığı gibi betonun elektriksel direncini artırdığı deney sonuçlarının düşük olmasından görülmüştür. Betonda ki

elektriksel özdirenci etkileyen en önemli faktörlerden birinin betonun boşluklu yapısı olduğu göz önünde bulundurulursa özdirencin artması betonun içyapısının iyileştiğinin ve boşluk miktarının azaldığının göstergesidir. Ayrıca geçirimliliğine beton kürünün de etkisi göz ardı edilmemelidir. Yapılan literatür araştırmaları ve hızlı klor deney sonuçlarına göre aynı dayanıma sahip geleneksel betonla KYB karşılaştırıldığında, geleneksel betonun yüksek klor geçirimliliğine sahip olduğunu KYB'nin ise geleneksel betondan daha az klor geçirimliliğe sahip olduğu belirtilmiştir. Mineral katkı kullanılarak üretilen KYB'lerin ise düşük veya çok düşük klor geçirimliliğe sahip olduğu incelenen her çalışmanın ortak sonucudur.

Duman (2010) yaptığı çalışmasında %5, %10 ve %15 SD kullanarak ürettiği betonlara 90 günlük klor geçirimliliği deneyi yapmıştır. Elde ettiği sonuçları incelediğimizde kontrol betonuna göre %5 SD de %15, %10 SD de %37, %15 SD de %49 luk bir azalma gözlemlenmiştir. Bu da SD oranının artmasının geçirimliliği düşürdüğünü orta geçirimlilikte ki bir betonu düşük geçirimlilikte ki bir betona dönüştürdüğünü söyleyebiliriz. Ayrıca en düşük geçirimliliğe de %15 SD katkılı betonda ulaşmıştır. Haberal (2010) yaptığı çalışmasında %15, %30 ve %45 oranlarında UK kullanarak ürettiği betonların klor geçirimliliği test sonuçlarına göre kontrol betonunun 4000 coulomb dan fazla bir değer vermesiyle yüksek geçirimliliğe sahip, %15 UK nın kontrol betonuna göre %70, %30 UK nın %78 ve %45 UK nın ise %84 bir azalma gösterdiğini deney sonuçlarına göre söylemek mümkündür. En az geçirimliliğe %45 UK kullanılarak elde etmiştir. Toutanji vd (1999) yaptıkları çalışmalarında %5 - %15 SD katkılı ve S/B oranı düşük numuneler üretmişlerdir. Aynı şekilde Şengül vd (2003)'da yaptıkları çalışmalarında %10 - %70 UK katkılı ve S/B oranı düşük beton numuneler üretmişlerdir. Ürettikleri numunelerin klor geçirimliliği deneylerini yapmışlardır. Sonuç olarak ise Toutanji vd (1999) %15 SD katkılı numunelerde en az geçirimliliğe ulaşmışlardır. Şengül vd (2003) %40 UK katkılı numunelerde en az geçirimliliğe ulaşmışlardır. Yapılan literatür taramalarında da görüldüğü gibi %15 SD ve %45 UK oranı klor geçirimliliği bakımından optimum seviye olarak söylenebilir. Yaptığımız deney sonuçları da bu araştırmalara benzer özellik göstermektedir. %15 SD ve %45 UK miktarı belirtilen miktarlardan fazla olduğu zaman ya geçirimlilik miktarı

değişmemekte ya da artmaktadır. Fakat betonun dayanım özelliği de göz önüne alındığında belirtilen optimum seviyeden fazla kullanılan mineral katkıların dayanımı azalttığı da göz ardı edilmemelidir.



## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada C25/30, C35/45 geleneksel beton ile su/bağlayıcı miktarı sabit tutularak çimento yerine değişik oranlarda ikame edilen uçucu kül ve silis dumanı katkılı KYB üretilmiştir. Toplam da 9 farklı grupta beton numuneler üretilmiştir. Üretilen betonlara taze beton deneylerinden olan çökme – yayılma, V- hunisi, L- kutusu, U- kutusu deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri olan basınç dayanım, eğilme dayanımı, hızlı klor iyon geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Geleneksel betonlarda yapılan çökme deneyleri sonucunda C25/30 için 14 cm, C35/45 için 12 cm çökme miktarı ölçülmüştür. Elde edilen deney sonucuna göre geleneksel betonda dayanım arttıkça çökme değeri de azalmaktadır. Betonda S/B oranı azaldıkça dayanım artmaktadır. Beton bünyesinde ki suyun iki görevi vardır diyebiliriz. Bunlardan birincisi beton mukavemetine etki eden yoğurma suyu ile çimento ile reaksiyona girerek bağlayıcı hamuru oluşturur. İkincisi ise akıcılığı sağlamaktır. Beton bünyesine girerek bağlayıcılığı sağlayan su miktarı akışkanlığı sağlamak için kullanılan su miktarından oldukça azdır. Betonun su miktarının belirlenmesinde akıcılığı sağlamak büyük rol oynamaktadır. Akıcılığı sağlamak için konulan su zamanla buharlaşarak betonun boşluklu yapıda olmasına neden olarak dayanımı düşürür. Doğal olarak betonun akışkanlığının fazla miktarda olmamasına dikkat edilir.

2. Yapılan çökme-yayılma deneyi sonuçlarına göre, en düşük yayılma çapı 67 cm ile %5 SD katkılı KYB’de gerçekleşirken, en yüksek yayılma çapı %45 UK katkılı KYB numunelerde 75 cm olarak ölçülmüştür. EFNARC (2005)’e göre yayılma çapları dikkate alındığında kontrol grubu, SD ve UK katkılı numunelerin hepsi SF2 sınıfında yer almaktadır. Viskozite için belirlenen T<sub>50</sub> süresine göre ise tüm numuneler VS2 sınıfı içerisinde kalmaktadır.

3. V hunisi deney sonuçlarına göre ise en düşük akış süresine KYB kontrol grubu sahip olurken, %45 UK katkılı KYB’nin en yüksek akış süresine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Hazırlanan numunelerin hiç birinde bloklaşma riskinin olmadığını

söyleyebiliriz. EFNARC (2005)'e göre bütün numunelerin akış süreleri bakımından VF1 sınıfında yer almaktadır.

4. L kutusu deney sonuçlarına göre; en düşük  $H_2/H_1$  oranı 0,81 ile KYB kontrol grubunda gözlemlenirken, %45 UK katkılı KYB'nin 0,95 ile en yüksek değere ulaştığı görülmüştür. Üretilen bütün numunelerin EFNARC (2005)'e göre PA2 sınıfında yer almaktadır.

5. U kutusu deney sonuçlarına göre en düşük  $\Delta h_{\max} = 2,20$  ile %45 UK katkılı KYB'de belirlenirken,  $\Delta h_{\max} = 2,80$  ile en yüksek değer KYB kontrol grubunda ölçülmüştür. Tüm grupların yeterli geçiş yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

6. SD'nin kullanım oranı arttıkça KYB'nin yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerinin UK'ya göre daha az olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. SD kullanım oranının artmasının viskoziteyi de arttırdığı gözlemlenmiştir. Betona katılan SD su ihtiyacını da arttıracak göz önünde bulundurularak optimum seviyede akışkanlaştırıcı katkı ile kullanılması betonun akışkanlığı açısından önemli bir etkidir.

7. UK'nın kullanım oranı arttıkça KYB'nin yerleşebilme, akıcılık, geçiş yeteneği ve doldurma yeteneği özelliklerinin SD'ye göre daha olumlu etki yaptığı gözlemlenmiştir. UK oranının artırılması viskoziteyi düşürmektedir. Dolayısıyla KYB'de kullanılan UK miktarının belli seviyede tutulması gerekliliği söylenebilir.

8. Basınç dayanımı deney sonuçlarına göre; SD kullanımının dayanımı artırdığı, UK kullanımının ise %30 oranına kadar dayanımda artış sağladığı, bu orandan sonra ise dayanımda azalmalar olduğu belirlenmiştir. Mineral katkı kullanılarak üretilen betonların dayanımının zamanla daha da arttığı gözlemlenmiştir. Üretilen KYB numuneleri içerisinde %15 SD katkılı numunelerin 28 ve 180 günlük basınç dayanımları sonucuna göre en yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Mekanik dayanım açısından uçucu kül ve silis dumanı katkılı numunelerin basınç dayanımı belirli bir ikame miktarına kadar dayanımı artırdığını söyleyebiliriz. SD ve UK katkılı

betonların dayanımının 28. günde bile artmasındaki önemli etkenin iyi kür koşulları olduğu söylenebilir.

**9.** Eğilme dayanımı deney sonuçlarına göre; SD kullanımının eğilme dayanımına da olumlu katkı sağladığı, UK kullanımının ise basınç dayanımında olduğu gibi %30 oranına kadar eğilme dayanımında da artış sağladığı, bu orandan sonra ise eğilme dayanımında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Mineral katkı kullanılarak üretilen betonların eğilme dayanımının basınç dayanımına benzer şekilde zamanla daha da arttığı gözlemlenmiştir. Üretilen KYB numuneleri içerisinde 28 ve 180 günlük eğilme dayanım sonucuna göre %15 SD katkılı numunelerin yüksek dayanıma sahip olduğu tespit edilmiştir. Mekanik dayanım açısından uçucu kül ve silis dumanı katkılı numunelerin eğilme dayanımı belirli bir ikame miktarına kadar dayanımı artırdığını söyleyebiliriz. Geleneksel beton ile KYB karşılaştırdığımız zaman ise basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da KYB'nin daha iyi davranış gösterdiği elde edilen deney sonuçlarından görülmektedir. Basınç dayanımı ile eğilme dayanımının benzer özellik gösterdiği literatürler de belirtilmektedir. Basınç dayanımı artışına paralel olarak eğilme dayanımı da artış göstermektedir.

**10.** Hızlı klor iyon geçirimliliği deney sonucuna göre ise; %45 UK katkılı numunelerin en düşük klor geçirimliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Kullanılan katkı miktarı arttıkça geçirimliliğinde azaldığı gözlemlenmiştir. Uçucu kül ve silis dumanının puzolanik aktivitelerinin yüksek olmasından dolayı betonun geçirimsizliğini artırmaktadırlar. KYB'nin geleneksel betona göre daha az geçirimsizliğe sahip olduğu yapılan deney sonuçlarında görülmüştür. Mineral katkı kullanılmadan üretilen betonların geçirimliliğinin mineral katkı kullanılarak üretilen betonlara göre daha fazla olduğu yapılan deney sonuçlarına göre belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak mineral katkı taneciklerinin çimento taneciklerinden boyut olarak daha küçük olması ve çimento tanecikleri arasında kalan boşlukları doldurması söylenebilir. Mineral katkıların ince yapısı betonda filler etkisi oluşturmaktadır. Tane çapının küçüklüğüne bağlı olarak yüzey alanı artmakta buna bağlı olarak da puzolanik aktivite artarak geçirimlilik azalmaktadır.

**11.** Bu alanda daha ileri düzeydeki araştırmalar için KYB’de diğerk imento türleri kullanarak, farklı S/ oranlarına sahip ve ağırlıkça çimentonun diğerk mineral katkılar ile farklı oranlar da ikame edilmesiyle üretilen betonların hızlı klor iyon geirimliliğı konusunun incelenmesinin faydası olacağına inanılmaktadır.

Yapılan sertleşmiş beton deney sonuçlarına göre KYB’nin dayanımlarının yüksek olduğı ve düşük geirimliliğıe sahip olduğı belirlenmiştir. Bu değıerlerin genel olarak kullanılan beton sınıflarından yüksek olduğı görülmektedir. KYB’nin kendi ağırlığı altında yerleşebilme özelliğı sayesinde yerleştirme sorunu çözme, işçilik ve enerji maliyetlerini azaltma, homojen karışım ve düzgün yüzey elde etme, çevresel kirliliğı  nleme vb.  zellikler göz önüne alındığında KYB kullanılmasının yaygınlaştırılması uygulama esnasında meydana gelen birçok problemi de  zeceğı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Doğan, A.Ü., Özkul, M.H., 2001. Kendiliğinden Yerleşen Beton Katkılarının Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkileri”, THBB Hazır Beton Dergisi, Sayı 47(1), 62-69.
- Acay, E., 2010. Kendiliğinden Yerleşen Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi. Yüksek Lisans, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Bilim Dalı.
- ACI Committee 234, 2000. Guide for the use of silica fume in concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills.
- Agar, E., Sütas, İ., Öztaş, G., 1998. Beton Yollar. İTÜ, İstanbul.
- Aharı, R. S., 2014. Mineral Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Betonun Reolojiki Tikotropik ve Geçirimsizlik Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Aitcin, P. C., 1998. High Performance Concrete. E and FN SPON, 650p, London and Newyork.
- Akman, M. S., 1987. Yapı Malzemeleri. İTÜ İnşaat Fakültesi yayını, 161, İstanbul.
- Anonymous, 2008. Final Report of RILEM TC 205-DSC: Durability of selfcompacting concrete. RILEM Technical Committee, Materials and Structures, 41(1), 225-233.
- ASTM C 618, 2000. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, The American Society for Testing and Materials, Pennsylvania.
- ASTM C 1202, 2007. Standard Test Method For Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, USA.
- ASTM C 618-85, Standard Specifications for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, ASTM, Philadelphia, USA.
- ASTM C-1202-97, 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, USA.
- Ataç, A., 2001. Çayırhan Uçucu Külü ile Üretilen Betonlarda Kür Koşullarının Beton Özelliklerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bader, M. A., 2003. Performance of concrete in a coastal environment, Cement and Concrete Composites, 25, 539–548.
- Baradan, B., Yazıcı, S., 2003. Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler, Türkiye Mühendislik Haberleri, 426 (10), 62-69.
- Baradan B., Yazıcı H., Ün H., 2002. Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 298, İzmir.
- Bentur, A., Goldman, A., ve Chen, M.D., 1988. The contributions of the transition zone to the strength of high quality silica fume concretes, Pittsburgh.
- Beshr, H., Almusallam, A.A., Maslehuddin, M., 2003. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Materials 17(1), 97-103.

- Biçer, A., Koç, T., Alıcılar, A., Arslan, A., 1997. Ceyhan Bölge, Dört Yol İşletme Müdürlüğü Tesislerindeki Beton Korozyonu Raporu. Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. Genel Müdürlüğü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Boel, V., Audenaert, K., Schutter G.D., 2002. Pore Structure of Self- Compacting Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidating Concrete
- Bouzoubaâ, N., Lachemi, M., 2001. Self-Compacting Concrete Incorporating High Volumes of Class F Fly Ash. Cement and Concrete Research, 31 (3), 413-420.
- Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I., Turner, K., 2002. Rapid testing method for segregation resistance of self-compacting concrete, Cement and Concrete Research 32(1), 1489-1496.
- Cilason, N., ve Aksoy, N., 2000. Beton Yapı Hasarları Onarım ve Korunması ve Sıcak İklimlerde Beton, Lebib Yalın Yayınları, İstanbul.
- Chia, K.S., and Zhang, M.H., 2002. Water permeability and chloride penetrability of high strength lightweight aggregate concrete. Cement and Concrete Research, 32, 639-645.
- Cho, H.T., Bucea, L., 1994. et al, Corrosion Behaviors of Steel Embedded in Fly Ash Blanded Cements, 3. Canmet/ACI International of Conference On Durability of Concrete, Supplementary Papers, p 215-227 Nice, France.
- Cnudde, V., Cwirzen, A., Masschaele, B. and Jacobs, P.J.S., 2009. Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes. Engineering Geology, 103, 76–83.
- Demir, İ., Durgun, M. Y., Kurt, D., 2009. Comparison the effects of two different pozzolans to hardened concrete. 5th International Advanced Technologies Symposium, Karabuk University, Karabuk, Turkey.
- Demirci, E. E., 2012. Kendilinden Yerleşen Ve Geleneksel Betonun Durabilite Potansiyellerinin Betonarme Kirişlerden Alınan Karot Örnekler Üzerinden Karşılaştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- DEHN, F., 2002. High Performance Self-Compacting Concretes for Bridge Construction, First North American Conference on the Design and Use of Self- Consolidating Concrete, strafford.
- De Schutter, G., 2005. Guidelines for testing fresh self- compacting concrete, European Research Project, Growth Contract No. Grd2-2000-30024, 9-16.
- Dinakar, P., Babu, K.G. and Santhanam, M., 2008. Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. Cement and Concrete Composites, 30(1), 880–886.
- Dinçer, R., Çağatay, İ.H., 2004. Pomza ile yapılan hafif betonların mekanik özellikleri. Ç.Ü. Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi, 19(2), 247-260.
- Doğan, Ü.A., 2008. Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü Çelik donatı korozyonuna etkisi. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğan, Ü. A., Özkul, M. H., 2009. Mineral katkılı betonlarda bileşimin basınç dayanımı ve geçirimsizliğe etkisi İTÜ, İstanbul.
- Domone, P.L., 2006. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, Cement & Concrete Composites 28(1), 197-208.

- Duman, R., 2010. Silis dumanının betonun performansına ve klor geçirimsizliğine etkilerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Malzemesi Bilim Dalı.
- Duyar, O., 2006. Avrupa kendiliğinden yerleşen beton şartnamesi ışığında tanımlar, dizayn yöntemi, deney metotları ve mühendislik özellikleri. THBB hazır beton dergisi, 75(1), 46-52.
- EFNARC, 2002-2005. Specification and guidelines for self-compacting concrete, Association House, 99 West Street, Farnham, Surrey GU9 7EN, UK, 1-40.
- Ekinci, C.E., 1995. Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, 741, Ankara.
- Ermco., 2005. The european guidelines for self-compacting concrete specification, production and use, The European Ready-mix Concrete Organisation, 10-68.
- Fang, W., Jianxiong, C., Changhui, Y., 1999. Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives, Proceedings of the First International RILEM Symposium, sweden.
- Felekoğlu, B., Türkel, S. and Baradan, B., 2004. Kendiliğinden yerleşen beton Bölüm 1 genel tanıtım kullanım alanları, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir şubesi, Haber Bülteni, (117) 20-24.
- Felekoğlu, B., 2003-2007. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Figueiras, H., Nunes, S., Coutinho, J.S., and Figueiras, J., 2009. Combined effect of two sustainable Technologies: Self-compacting concrete (SCC) and controlled permeability formwork (CPF). Construction and Building Materials, 23, 2518-2526.
- Geçten, O., Gül, R., 2013. Pomza ve Normal Agregalı Betonların Kılcal Geçirimsizliği ve Basınç Dayanımları Üzerine Kürün Etkileri, KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi, Kahramanmaraş.
- Ghezal, A., ve Khayat, H., 2002. Optimizing Self-Consolidating Concrete With Limestone Filler By Using Statistical Factorial Design Methods, ACI Materials J, 99(3) 264-272.
- Güner, M. S., 1999. Malzeme Bilimi – Yapı Malzemesi ve Beton Teknolojisi, Bakanlar Medya, İstanbul, 18-65.
- Gürdal, H., Yüceer, Z., 2004. Türkiye’de ve Dünya’da Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları, Hazır Beton Kongresi, İstanbul.
- Gökhan, D., 2008. Farklı Beton Sınıflarının Su İşleme Derinliğinin Değerlendirilmesi, Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic 11(4) , 379-383.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Güneyisi, E., Özturan, T., and Gesoğlu, M., 2002. Laboratory Investigation of Chloride Permeability for High Performance Concrete Containing Fly Ash and Silica Fume, Proceedings of the International Conference, Challenges of Concrete

- Construction, Editors: R.K. Dhir, P.C. Hewlett, L.J. Csetenyi, Dundee, Scotland, p, 295-305.
- Haberal, Y., 2010. Uçucu Küllü Betonlarda Klor İyonu Geçirgenliğinin ve Donatı Korozyonunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Bilim Dalı.
- Haktanır, T., Yurtal, R, 1991. Computer Aided Aggregates Proportioning for Concrete Mixes, Doğa Türk Mühendislik ve Çevre Dergisi 15,(2), 159-178.
- Haque, M.N., Kawamura, M., 1992. Carbonation and Chloride Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes, ACI Materials Journal, 89,(1).
- Hassan, A., Lachemi, M. and Hossain, K., 2012. Effect of Metakaolin and Silica Fume on Rheology of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 109, 657-664.
- Hassan, K. E., Cabrera, J. G., Maliehe, R. S., 2000. The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete. Cement and Concrete Composites, Vol. 22, (4) 267-271.
- Hernandez, M.G., Izquierdo, M.A.G., Ibanez, A., Anaya, J.J. and Ullate, L.G., 2000. Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. Ultrasonics, 38, 531-533.
- Ilıcalı, T., Yıldırım, H., Şengül, Ö., 2011. Betonda Farklı Çimento Kullanımının Klor Geçirimsiliğine Etkisi, İTÜ, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Ilıcalı, T., 2008. Farklı Çimentolarla Üretilen Betonlarda Sülfat Etkisi Ve Klorür Geçirimsiliği. Yüksek Lisans, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Fakültesi.
- Jensen, A.D., and Chatterji, S., 1996. State of the art report on micro-cracking and lifetime of concrete- part 1. Materials and Structures, 29, 3-8.
- Kandemir, H., 2014. Farklı mineral bağlayıcı bileşenlerin betonun kalıcılığına etkisi. Yüksek Lisans, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği.
- Kılıç, A., Atis, C.D., Teymen, A., Karahan, O., Özcan, F., Bilim, C., Özdemir, M., 2008. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete, Cement & Concrete Composites 30, 290-296.
- Khan, M. I., ve Lynsdale, C. J., 2002. Strength, Permeability and Carbonation of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Research 32,123-131.
- Khayat, KH., 1999-2000. Workability, Testing, and Performance of Self-Consolidating Concrete, ACI Materials Journal, 96,346-354.
- Khayat, K.H., and Aitcin P.C.,1992. Silica Fume in Concrete: an Overview, ACI SP-132, 835-865, ACI , Detroit.
- Kocataşkın, F.,1975. Yapı Malzemesi Bilimi. Birsen Kitabevi, 132, İstanbul.
- Kropp, J., and Hilsdorf, H.K., 2005. Performance Criteria for Concrete Durability. E & FN Spon, an imprint of Chapman & Hall, London.
- Kumar, R., and Bhattacharjee, B.,2003. Study on some factors affecting the results in the use of MIP method in concrete research. Cement and Concrete Research, 33, 417-424.
- Kurt, E. B., 2007. Silis Dumanının Betonun Durabilite Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Leemann, A., Münch, B., Gasser, P., Holzer, L., 2006. Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete. Cement and Concrete Research (36), 1425-1433.

- Mather, B., 2004. Concrete Durability, 26, 3-4.
- Mehta, P. K., 1986,2000. Condensed Silica Fume, Cement Replacing Materials, Vol.3, Surrey University Press, 136, 137.
- Mehta, P.K., 1983. Pozzolan and Cementitious by-Products as Mineral Admixtures for Concrete: A Critical Review,” The use of fly ash, silica fume, slag and other Mineral by-products in concrete, American Concrete Institute special publication Detroit.
- Neville, A.M., and Brooks, J.J., 1987, Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, New York, 275-282.
- Neville, A. M., 1988. Properties of Concrete. inc. Third edition, 779, New York.
- Neville, A., 2004. The confused world of sülfatı attack on concrete, Cement and Concrete Research, 34(1), 1275–1296.
- Neville, A.M., 1995. Properties of concrete , Longman Group, Burnt Mill, Harlow Essex CM 20 2JE, England.
- Oh, B. H., Cha, S. W., Jang, B. S., ve Jang, S. Y., 2002. Development of High Performance Concrete Having High Resistance to Chloride Penetration, Nuclear Engineering and Design 212, 221-231.
- Okamura, H., and Ouchi, M., 1999. Self Compacting Concrete Development, Present Use and Future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, Stockholm, Sweden.
- Okamura, H., and Ozawa, K., 1995. Mix-Design for Self Compacting Concrete, Concrete Library of JSCE, 25, 107-120
- Onaran, K., 2000. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Orhan, E., 2012. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Katkı Oranları Değişiminin Betonun Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.
- Ouchi, M., 1999. Self-compacting concrete – Development, applications and investigations, Nordic Concrete Research Committee Publications.
- Öner, A., Yıldız, R., 2003. Betonun iç ve dış ortam etkilerine dayanıklılığı üzerine genel bir Bakış, Kocaeli Teknik Bülten.
- Özcan, F., 2005. Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kur ile Dayanım Tahmini, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Özel, C., 2007. Katkılı Betonların Reolojik Özelliklerinin Taze Beton Deney Yöntemlerine Göre Belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özey, İ., 1992. Rijit Üstyapı ile Esnek Üstyapının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay M. ve Uyan, M., 2004. Her Yönüyle Beton. Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- Özkul H., Taşdemir M.A., Tokyay M., Uyan M., 1999. Her Yönüyle Beton. THBB yayını, 121, İstanbul.
- Özkul, M.H., 2005. Kendiliğinden yerleşen betonların genel özellikleri. Yapılarda Kimyasal Katkılar (Beton ve Harçlar) Sempozyumu, Ankara.
- Özkul, M.H., Doğan, Ü.A., Çavdar, Z., Sağlam, A.R., ve Parlak, N., 1999. Properties Of Fresh And Hardened Concretes Prepared By New Generation Superplasticizers, Creating With Concrete Proc. Int. Conference, Dundee, U.K, 467-474.

- Poon, C.S., Lam, L., and Wong, Y.L., 1999. Effect of fly ash and silica fume on interfacial porosity of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11 (3),
- Postacıoğlu, B., 1986-1987. Beton : Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul , 34-86.
- Ramsburg, P., Neal, R.E., 2002. The use of a natural pozzolan to enhance the properties of self-consolidating concrete, First North American Conference On the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 451-456. 197-205.
- Ramyar, K., 2007. Portland Çimentosu – Süper akışkanlaştırıcı Katkı Uyumunu Etkileyen Faktörler, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, İzmir.
- Richtie, A. G. B., 1962. The Triaxial Testing of Fresh Concrete. *Magazine of Concrete Research* 14 (40), 37-41.
- Roussel, N., Stefani, C., Leroy, R., 2005. “From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests, *Cement and Concrete Research* 35, 817-822.
- Sağlam, A. R., Mutlu, M., 2001. Taze Betonda İşlenebilmenin Ölçülmesi ve Deney Aletlerinin İrdelenmesi. Sika Yapı Kimyasalları, 8, İstanbul.
- Schindler, A.K., McCullough, B.F., 2002. The Importance of Concrete Temperature Control During Concrete Pavement Construction in Hot Weather Conditions, A paper offered for publication at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Schiessl, P. And Hardtl, R., 1994. Relationship Between Durability and Pore Structure Properties of Concretes Containing Fly Ash, *Proceedings of Metha Symposium on Durability of Concrete*, p 99-117, Nice.
- Sellevod, E.J., 1984. Review: Microsilica in Concrete”, Project Report No: 08037-EJSTJJ, Norwegian Building Research Institute, Oslo.
- Sirivnatnanon, V., 1994. et al, Mechanical and Durability Properties of High Colume Fly Ash Concrete, 3. CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Supplementary Papers, p 967-983, Nice, France.
- Shah, P., ve Ahmad, S.H., 1994. High performance concretes and applications, 90 Tottenham Court Road, London 141-374.
- Shergold, F. A., 1953. The percentage Words in Compacted Grawel as a Measure of its Angularity, *Mag. Conc. Res.* 5 (13), 3-10.
- Short, A., and Kinniburgh., 1978. *Lightweight Concrete*. Applied Science Publishers Ltd. 443, London.
- Skarendahl, A., and Peterson, S.Ö., 2000. Self-Compacting Concrete, State of the Art Report of RILEM TC174-SCC, France, 47-55.
- Sonebi, M., Bartos, P.J.M., Zhu, W., Gibbs, J., and Tamimi, A., 2000. Properties of hardened concrete, brite euram project, Rational Production and Improved Working Environment Through Using SCC, Final Report, Adv. Conc. Mas. Cen, University of Paisley, 73 p, Scotland.
- Song, H.W., and Kwon, S.J., 2007. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. *Cement and Concrete Research*, 37, 909-915.
- Sönmez, H.T., 2008. Yüksek Fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Betonlara Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi.

- Şahin, R., 2003. Normal portland çimentolu betonların don direncinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu ve hasar analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Şahmaran, M., Yaman, Ö. İ., Tokyay, M., 2004. Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton, ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M. A., Gjorv, O.E., 2007. Puzolanik Malzemelerin Betonun Mekanik Özellikleri ve Klor İyonu Yayınımına Etkisi, *itüdergisi/d mühendislik*, 6, 53-64.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A. ve Sönmez, R., 2003. Yüksek oranda uçucu kül içeren normal ve yüksek dayanımlı betonların klor geçirimsizliği, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Şengül, Ö., Taşdemir, C., ve Taşdemir, M.A., 2005. Mechanical properties and rapid chloride permeability of concretes with ground fly ash, *ACI Materials Journal*, 102(6), 414-421.
- Şengül, Ö., Taşdemir, M.A., ve Odd, E., 2007. Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özellikleri ve klor iyonu yayınımına etkisi , *İTÜ dergisi*, 6(1), 53-64.
- Şengül, Ö., 2011. Klor İyonu Etkisindeki Betonarme Yapı Elemanlarının Dayanıklılığı İçin Olasılığa Dayalı Tasarım. *İMO Teknik Dergi*, 2011(349), 5409-5423.
- Şengül, F., Taşdemir, Ö., 2015. Kür Koşulları ve Tecrit Malzemesinin Betonun Geçirimsizlik ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Şimşek, Z., Akıncıtürk, N., 2006. Betonarme yapı elemanları üzerindeki basınçlı yeraltı su geçirimsizliğine puzolan katkı maddelerinin etkisi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi* 11(2).
- Şimşek, O., 2004. Beton ve Beton Teknolojisi , Seçkin Basım ve Dağıtım, Ankara.
- Şimşek, O., Erdal, M., ve Sancak, E., 2005. Silis Dumanının Çelik Lifli Betonun Eğilme Dayanımına Etkisi, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak.* 20(2), 211-215.
- Şimşek, O., 1991,2004. Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Taşdemir, M.A., 1998. Betonun mekanik davranışına mikroyapısal etkiler. X. Ulusal Mekanik Kongresi, 17-37, İstanbul.
- Thomas, M. D. A., ve Matthews, J. D., 2004. Performance of pfa concrete in a marine environment- 10 year results, *Cement and Concrete Composites*, 26,(1) 5–20.
- Tohumcu, İ., Bingöl, A. F., 2013. Silis Dumanı ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri ve Basınç Dayanımları. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2), 31-44.
- Topçu, D.B., Uygunoğlu, T., Ünal, O., 2007. Kendiliğinden yerleşen yarı hafif betonların özelliklerinin araştırılması. *TÇMB*, 3. Uluslararası Çimento ve Betonda Sürdürülebilirlik Sempozyumu, İstanbul.
- Türk, K., Karataş, M., Turgut, P., Benli, A., 2010. Farklı Tip ve Miktarda Puzolan İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanım ve Elastisite Modülü Arasındaki İlişki. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 247-253.
- TS 802, 1985. Beton Karışımı Hesap Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206-1. 2002. Beton-Bölüm1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS EN 197-1, 2012. Genel Çimentolar – Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1, 2006. Uçucu kül – Betonda kullanım için – Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriteri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 706, 1969. Beton agregaları, Türk Standartları Enstitüsü Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellik ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.
- Türk, K., Karataş, M., Ulucan, Z. Ç., 2006. Farklı Oranlarda F Sınıfı Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Sıkışan Betonun Dayanım Özellikleri”, Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi. 18 (4), 513-520.
- Türkmen, D., Gavgalı, M., Gül R., 2003. Influence of Mineral Admixtures on the Mechanical Properties of Corrosion of Steel Embedded in High Strength Concrete, Materials Letters, 57, 2037-2043.
- Türkoğlu, A., 2010. Puzolanik Malzemelerin Betonun Basınç Dayanımı Ve Klor İyonu Geçirimsizliğine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği
- Ünal O., Topçu İ. B., Uygunoğlu T., 2006. “Kendiliğinden yerleşen betonda mermer tozu kullanılması”, Mersem’2006, Türkiye V. Mermer ve Doğal taş Sempozyumu, 2-3 Mart, Afyonkarahisar, 413-420.
- Valcuende, M., and Parra, C., 2010. Natural carbonation of self-compacting concretes. Construction and Building Materials, 24, 848–853.
- Wallevik, J.E., 2003. Rheology of Particle Suspensions - Fresh Concrete, Mortar and Cement Paste with Various Types of Lignosulfonates, PhD Thesis, The Norwegian University of Science and Technology, France.
- Walraven, J., 2002. Self-Compacting Concrete in the Netherlands, First North American Conference.
- Win, P.P., Watanabe, M., Machida, A., 2004. Penetration Profile Of Chloride İon in Cracked Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research 34 ,1073-1079.
- Wüstholtz, T., 2003. Fresh properties of self-compacting concrete , Otto- Graf-Journal 14, 179-188.
- Uysal, M., and Akyuncu, V., 2012. Durability Performance of Concrete incorporation Class F and Class C Fly Ashes, Construction and Building Materials, 34, 170-178.
- Yaşarer, F., 2008. Pomzalı Boyalarla Kaplanan ve Deniz Suyunda Bekletilen Betonların Performansı. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği
- Yardımcı, M., 2007. Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik, Kırılma Parametrelerinin Araştırılması ve Optimum Tasarımı, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yazıcı, H., 2008. The effect of silica fume and high-volume class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self compacting concrete. Construction and Building Materials, 22, 456-462.
- Ye, G., Liu, X., Schutter, G.D., Poppe, A.M., and Taerwe, L., 2007. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. Cement and Concrete Composites, 29, 94-102.

- Yener, E., 2004. Uçucu Kül Ve Silis Dumanı Katkılı Yol Betonların Dayanım Ve Dayanıklık Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- Yılmaz, B., Dinç, A., Şengül, C., Akkaya, Y. ve Taşdemir, M.A., 2007. Su/ince Malzeme oranı ve çelik lif dayanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik ve Mekanik Davranışlarına Etkileri. 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yılmaz, İ., 2018. Uçucu Kül , Yüksek Fırın Cürufu Ve Zeolit Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların İşlenebilirlik ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Koceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği.
- Yiğiter, H., Yazıcı, H., ve Aydın, S., 2007. Effects of cement type, water/cement ratio and cement content on sea water resistance of concrete, Building and Environment, 42, 1770–1776.
- Yiğiter, H., 2008. Betonarme donatısında klorid korozyonu gelişiminin elektrokimyasal Yöntemlerle belirlenmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yogendran, V., Langan, B.W., Hague, M.N., Ward, M.A., 1987. Silica Fume in High Strength Concrete. ACI Materials Journal, Detroit, 84 (2), 124- 129.
- Young, J.F., 1988. A review of the pore structure of cement paste and concrete and its influence on permeability. Permeability of Concrete, ACI Publication SP, 108, 1-18, Detroit.
- Yücel, K.T., 1997. Pompa Betonlarında İşlenebilirliğin Harç Fazının Reolojisine Dayanarak Belirlenmesi. Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yüzer, N., Aköz, F., 2003. Silis Dumarı Katkılı Betonlarda Klorür Etkisi, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul.
- Zhu, W., and Bartos, P.J .M., 2003, Permeation Properties of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 33(1) 921-926.

## ÖZGEÇMİŞ

Ayhan Soner AĞSU, 1987 yılında Erzurum İli, Pasinler İlçesi'nde doğdu. İlkokulu Pasinler'de, orta ve lise Erzurum'da tamamladı. 2005 yılında kazandığı Atatürk Üniversitesi Pasinler Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümünü 2007 yılında tamamladı. 2008 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2012 yılında tamamladı. 2012 yılından beri özel sektörde çalışmaktadır.

