



T.C.  
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIĞIN HAVA SÜRÜKLENMİŞ BETONUN  
BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

AHMAD WALİ AMIRY

Nisan 2017



T.C.  
ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIĞIN HAVA SÜRÜKLENMİŞ BETONUN  
BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

AHMAD WALİ AMIRY

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Nisan 2017

Ahmad Wali AMIRY tarafından Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU danışmanlığında hazırlanan “Yüksek Sıcaklığın Hava Sürüklenmiş Betonun Basınç Dayanımına Etkisi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Fatih ÖZCAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç.Dr. Mustafa FENER, Ankara Üniversitesi,

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ....../...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun ....../...../20.... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT  
MÜDÜR V.

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmad Wali AMIRY



## ÖZET

### YÜKSEK SICAKLIĞIN HAVA SÜRÜKLENMİŞ BETONUN BASINÇ DAYANIMINA ETKİSİ

AMIRY, Ahmad Wali

Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

Nisan 2017, 70 sayfa

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın hava sürüklenmiş betonun özelliklerine etkisi incelenmiştir. Karışımların çimento miktarı ve su-çimento oranı sabit tutularak %0.025, %0.050, %0.075 ve %0.1 oranlarında hava sürükleyici katkı ilavesi ile toplam 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Numunelerin, taze birim hacim ağırlığı, yayılma çapı, hava muhtevası ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını belirlemek amacıyla, numuneler elektrikli fırında 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüş, ayrıca numunelerin mineral ve doku değişimlerinin mikroskobik analizi yapılmıştır. Hava sürükleyici katkı kullanımı numunelerin basınç dayanımlarını azaltmıştır. Hava sürükleyici katkının yüksek sıcaklık etkisi altında beton özelliklerine olumlu bir etkisi görülmemiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Hava sürükleyici katkı, beton, yüksek sıcaklık, basınç dayanımı, polarizan mikroskop analizi, mikroyapı

## SUMMARY

### THE EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURE ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF AIR-ENTRAINED CONCRETE

AMIRY, Ahmad Wali

Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Associate Professor Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

April 2017, 70 pages

In this study, the effect of elevated temperature on the compressive strength of air-entrained concrete was investigated. Five different mixtures were prepared with the addition of air entraining additive of 0.025%, 0.050%, 0.075% and 0.1% with keeping the cement amount and water-cement ratio constant. The fresh unit volume weights, flow diameters, air contents and compressive strengths of the mixtures were measured. Also, the specimens were left in the electric furnace at the temperature of 250, 500, 750 and 1000 °C in order to determine the behavior of the specimens at elevated temperatures and they were left for two hours at these temperatures. The compressive strengths and ultrasonic wave velocity values of the specimens which were exposed to elevated temperatures were measured. In addition the microscopic analysis of mineral and texture changes of the specimens was also carried out. The use of air entraining additives reduced the compressive strength of the samples. Air entraining admixture didn't positively affect properties of the concrete on the elevated temperatures.

*Keywords:* Air entraining admixture, concrete, elevated temperature, compressive strength, polarized microscope analysis, microstructure

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında desteklerinden dolayı Sayın Doç.Dr. Fatih ÖZCAN'a, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Mustafa FENER'e ve Yaşar GÜNEŞ'e Yusuf BEKTAŞ'a Gökhan PEHLİVANTÜRK'e ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme, şükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                          | iv   |
| SUMMARY .....                                                       | v    |
| ÖN SÖZ .....                                                        | vi   |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....                                            | vii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                             | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                               | x    |
| FOTOĞRAFLAR DİZİNİ .....                                            | xii  |
| SİMGE VE KISALTMALAR .....                                          | xiii |
| BÖLÜM I GİRİŞ .....                                                 | 1    |
| BÖLÜM II ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....                                    | 3    |
| 2.1 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton .....                           | 3    |
| 2.1.1 Yüksek sıcaklık kaynakları .....                              | 3    |
| 2.1.1.1 Yangın etkileri .....                                       | 3    |
| 2.1.1.2 Endüstri fırın bacaları .....                               | 5    |
| 2.1.1.3 Hava alanı pistleri .....                                   | 5    |
| 2.1.1.4 Nükleer reaktörler .....                                    | 5    |
| 2.1.2 Yüksek sıcaklığın betona etkisi.....                          | 6    |
| 2.1.2.1 Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi.....              | 7    |
| 2.1.2.2 Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi .....                     | 11   |
| 2.1.2.3 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliğine etkisi.....   | 13   |
| 2.1.2.4 Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkisi..... | 16   |
| 2.2 Hava Sürüklenmiş Beton .....                                    | 18   |
| 2.2.1 Hava sürüklenmiş betona hava boşluğu oluşumu .....            | 19   |
| 2.2.2 Hava boşluğu sistemi .....                                    | 20   |
| 2.2.3 Sürüklenmiş havanın beton özelliklerine etkisi .....          | 20   |
| 2.2.4 Hava sürüklemeyi etkileyen parametreler.....                  | 21   |
| BÖLÜM III MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA .....             | 24   |
| 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri .....                            | 24   |
| 3.1.1 Çimento .....                                                 | 24   |
| 3.1.2 Agrega .....                                                  | 25   |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3 Hava sürükleyici katkı malzemesi .....                         | 28 |
| 3.1.4 Karışım ve bakım suyu .....                                    | 28 |
| 3.2 Beton Karışım Oranları .....                                     | 29 |
| 3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....                            | 29 |
| 3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar .....           | 31 |
| 3.4.1 Taze beton birim hacim ağırlığının belirlenmesi.....           | 31 |
| 3.4.2 Yayılma tablası deneyi .....                                   | 32 |
| 3.4.3 Hava muhtevasının tayini deneyi .....                          | 32 |
| 3.4.4 Basınç dayanımı .....                                          | 33 |
| 3.4.5 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi .....                      | 36 |
| 3.4.6 Mineral ve doku değişimlerinin mikroskobik analizi.....        | 37 |
| 3.4.6.1 İnce kesitlerin hazırlanması.....                            | 38 |
| 3.4.6.2 İnce kesitlerin bölgelere ayrılması.....                     | 39 |
| 3.4.6.3 Polarizan mikroskop analizi .....                            | 40 |
| BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                  | 42 |
| 4.1 Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı .....                            | 42 |
| 4.2 Yayılma Tablası Deneyi .....                                     | 42 |
| 4.3 Hava Muhtevasının Tayini Deneyi .....                            | 43 |
| 4.4 Basınç Dayanımı .....                                            | 43 |
| 4.5 Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımına Etkisi.....                  | 45 |
| 4.6 Yüksek Sıcaklığın Ultrases Geçiş Hızına Etkisi .....             | 49 |
| 4.7 Mineral ve Doku Değişimlerinin Mikroskobik Analiz Sonuçları..... | 51 |
| 4.7.1 Minerolojik ve petrografik bulgular.....                       | 51 |
| 4.7.2 Hava sürükleyicilerin neden olduğu boşluk dağılımı.....        | 54 |
| 4.7.3 Dokusal değişim.....                                           | 56 |
| BÖLÜM V SONUÇLAR .....                                               | 61 |
| KAYNAKLAR .....                                                      | 64 |
| ÖZ GEÇMİŞ .....                                                      | 70 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|              |                                                                               |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. | Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri .....                              | 24 |
| Çizelge 3.2. | Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri .....                              | 25 |
| Çizelge 3.3. | Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....           | 25 |
| Çizelge 3.4. | Dere kumu elek analizi sonucu.....                                            | 26 |
| Çizelge 3.5. | Kırma kum elek analizi sonucu.....                                            | 26 |
| Çizelge 3.6. | İri agrega elek analizi sonucu .....                                          | 27 |
| Çizelge 3.7. | Kullanılan agreganın granülometrisi .....                                     | 27 |
| Çizelge 3.8. | Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları .....                        | 29 |
| Çizelge 4.1. | Karışımlara ait yayılma tablası deney sonuçları (cm).....                     | 42 |
| Çizelge 4.2. | Karışımlara ait hava muhtevası değerleri (%).....                             | 43 |
| Çizelge 4.3. | Çalışmada kullanılan betonların basınç dayanımları (MPa).....                 | 43 |
| Çizelge 4.4. | Havada soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa).....                 | 46 |
| Çizelge 4.5. | Suda soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa).....                   | 46 |
| Çizelge 4.6. | Havada soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri<br>(km/sn)..... | 49 |
| Çizelge 4.7. | Suda soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri<br>(km/sn).....   | 49 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |                                                                                               |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1.  | Standart sıcaklık-zaman eğrisi .....                                                          | 5  |
| Şekil 2.2.  | Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi .....                                          | 10 |
| Şekil 2.3.  | Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi .....                                    | 10 |
| Şekil 2.4.  | Çimento hamurunda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi.....                                    | 11 |
| Şekil 2.5.  | Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi .....                                                    | 14 |
| Şekil 2.6.  | Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi.....                                         | 17 |
| Şekil 2.7.  | Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı.....                                           | 19 |
| Şekil 2.8.  | HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları .....                           | 19 |
| Şekil 3.1.  | Kullanılan agreganın granülometri eğrisi.....                                                 | 28 |
| Şekil 4.1.  | Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç dayanımları .....                               | 44 |
| Şekil 4.2.  | Hava muhtevasının beton basınç dayanımına etkisi.....                                         | 45 |
| Şekil 4.3.  | Havada soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa). ....                                | 47 |
| Şekil 4.4.  | Suda soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa).....                                   | 48 |
| Şekil 4.5.  | Havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki ..... | 50 |
| Şekil 4.6.  | Suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızlar arasındaki ilişki .....    | 51 |
| Şekil 4.7.  | Betonda gözlenen az fosilli mikrokristalize kireçtaşı (ÇN) .....                              | 52 |
| Şekil 4.8.  | Betonda gözlenen az fosilli mikrokristalize kireçtaşı (TN).....                               | 52 |
| Şekil 4.9.  | Beton matriksinde gözlenen kum ve silt boyutundaki kuva kristalleri (ÇN) .....                | 53 |
| Şekil 4.10. | Beton matriksinde gözlenen kum ve silt boyutundaki kuva kristalleri (TN).....                 | 53 |
| Şekil 4.11. | Hava sürükleyici katkının neden olduğu boşluk dağılımı v geometrisi (TN).....                 | 54 |
| Şekil 4.12. | Beton matriksinde gözlenen iç içe geçmiş boşluk görüntüleri (ÇN) .                            | 55 |
| Şekil 4.13. | Beton matriksinde gözlenen iç içe geçmiş boşluk görüntüleri (ÇN)                              | 55 |
| Şekil 4.14. | Kuvarsı saran matriks içerisinde gözlenen boşlukların görüntüsü (ÇN).....                     | 56 |

|             |                                                              |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.15. | Dıştan içe doğru numunelerde gözlenen doku değişimleri ..... | 57 |
| Şekil 4.16. | Boşluk iç çeperlerinde gözlenen bozuşma (Ç.N) .....          | 59 |
| Şekil 4.17. | Boşluk iç çeperlerinde gözlenen bozuşma (Ç.N) .....          | 60 |



## FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

|                |                                                                  |    |
|----------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Fotoğraf 3.1.  | Taze betonun hazırlanması .....                                  | 30 |
| Fotoğraf 3.2.  | Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali .....              | 31 |
| Fotoğraf 3.3.  | Yayılma tablası deneyi .....                                     | 32 |
| Fotoğraf 3.4.  | Betonda hava muhtevası ölçmesi için kullanılan deney aleti ..... | 33 |
| Fotoğraf 3.5.  | Basınç dayanımı test cihazı .....                                | 34 |
| Fotoğraf 3.6.  | Deney numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması .....     | 35 |
| Fotoğraf 3.7.  | Numunelerin havada soğutulması .....                             | 35 |
| Fotoğraf 3.8.  | Numunelerin suda soğutulması .....                               | 36 |
| Fotoğraf 3.9.  | Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi .....            | 37 |
| Fotoğraf 3.10. | Numunelerin boyut indirgemesi ve ince kesit hazırlama süreci ..  | 38 |
| Fotoğraf 3.11. | İnce kesit yapılmış numunelerin bölgelere ayrılması .....        | 40 |
| Fotoğraf 3.12. | Polarizan mikroskop .....                                        | 41 |

## SİMGE VE KISALTMALAR

| Simgeler | Açıklama                                      |
|----------|-----------------------------------------------|
| $f_c$    | : Basınç dayanımı                             |
| P        | : Prestes kırılma anında okunan en büyük yük  |
| $A_c$    | : Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı |
| MPa      | : Megapaskal                                  |
| ÇN       | : Çift nikol                                  |
| TN       | : Tek nikol                                   |

## BÖLÜM I

### GİRİŞ

Yapılarda durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilere biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003). Örneğin Danimarka’da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile beton da meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara ve New York’taki Dünya Ticaret Merkezi Binalarının çökmesi ile çok sayıda can ve mal kaybına yol açmıştır (Khouri, 2003; Schrefler vd., 2003; Baradan vd., 2002).

Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922’den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmasına çalışılmıştır (Khouri, 1992). İlk başlarda yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerine odaklanılmıştı. Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmelidir. Çünkü bu betonların boşluk oranı düşük, yapısı daha yoğun olduğu için yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşüktür (Schrefler vd., 2003).

Yapılan çalışmalar sonucunda betonun birçok yapı malzemesine göre yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığını etkileyen faktörler, malzemeye ilgili faktörler ve çevresel faktörler olarak iki gruba ayrılır. Malzemeye ilgili faktörler agrega özellikleri, agrega çimento hamuru arasındaki bağ, bileşenlerin ısıl uyumu ve çimento hamurunun özellikleri olarak sayılır. Çevresel faktörler; ısıtma derecesi, betonun en yüksek sıcaklıkta karşı karşıya kaldığı süre, soğuma derecesi, soğutma şekli, yükleme

koşulları ve nem durumudur. Beton yapıların yüksek sıcaklıklarla karşı karşıya kalma sürecinde ve bu sürecin ardından göstereceği tepkileri öngörebilmek için, betonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyice bilinmesi gerekir (Peng vd., 2001).

Beton teknolojisinde hava sürükleyici katkıları (HSK) olarak adlandırılan yüzey aktif kimyasalların kullanılmasıyla beton içerisinde boyutları 10 µm ile 1 mm arasında değişen küresel hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu hava kabarcıkları beton üretilirken karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı paletlerinin yaptığı mekanik etki sonucu oluşmakta ve HSK molekülleri tarafından kararlılıkları ve stabiliteyi sağlanmaktadır. HSK molekülleri su seven (hidrofilik) baş kısmından ve su sevmeyen (hidrofobik) kuyruk kısmından meydana gelmektedir (Myers, 2006).

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın hava sürüklenmiş betonun bazı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Karışımların çimento miktarı ve su-çimento oranı sabit tutularak %0.025, %0.050, %0.075 ve %0.1 hava sürükleyici katkı ilavesi ile toplam 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Numunelerin, taze birim hacim ağırlığı, yayılma çapı, hava muhtevası ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını belirlemek amacıyla, numuneler elektrikli fırında 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı ve p- dalga hızı değerleri ölçülmüş, ayrıca numunelerin mineral ve doku değişimlerinin mikroskopik analizi yapılarak hava sürüklenmiş betona yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır.

## BÖLÜM II

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

#### 2.1 Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton

Yapılarda durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilere biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın ve Baradan, 2003).

Genellikle betonda yüksek sıcaklık etkisi çalışmaları, yüksek sıcaklık altındaki betonun yapısında meydana gelen gerilme ve şekil değiştirmeleri belirlemek ve betonun yangın dayanımını geliştirmek için, yüksek sıcaklık altında kalan beton malzemelerin özelliklerindeki azalmaları araştırmak amacıyla yapılmaktadır. Yapılan çalışmalarda yangın veya yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların gerçek davranışlarının, çevresel ve malzeme faktörlerinin ikisini de içeren, aynı zamanda birbirlerini etkileyen bu faktörlerin sonuçlarına bağlı olduğunu göstermektedir (Demir, 2008).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Akman, 2000; Riley, 1991). Artan kalan dayanımlara, 1-3 saat uygulanan yüksek sıcaklığın önemli etkisinin olduğu, uygulama süresinin artmasıyla etkinin azaldığı, bu nedenle meydana gelen dayanım azalmalarının ilk iki saat içerisinde gerçekleştiği sonucu ortaya çıkmıştır (Topçu ve Demir, 2007).

##### 2.1.1 Yüksek sıcaklık kaynakları

###### 2.1.1.1 Yangın etkileri

Yangının, gerekli önlemler alınmadığı takdirde can ve mal kaybına neden olan doğal bir olay olduğu bilinmektedir. Yangının oluşabilmesi için yanıcı malzeme, oksijen ve bir ısı kaynağının bir arada bulunması gerektiği de açıktır. Bu birlikteliğin oluşma ihtimali diğer bir deyişle yangın çıkma ihtimali birçok yapıda mevcuttur.

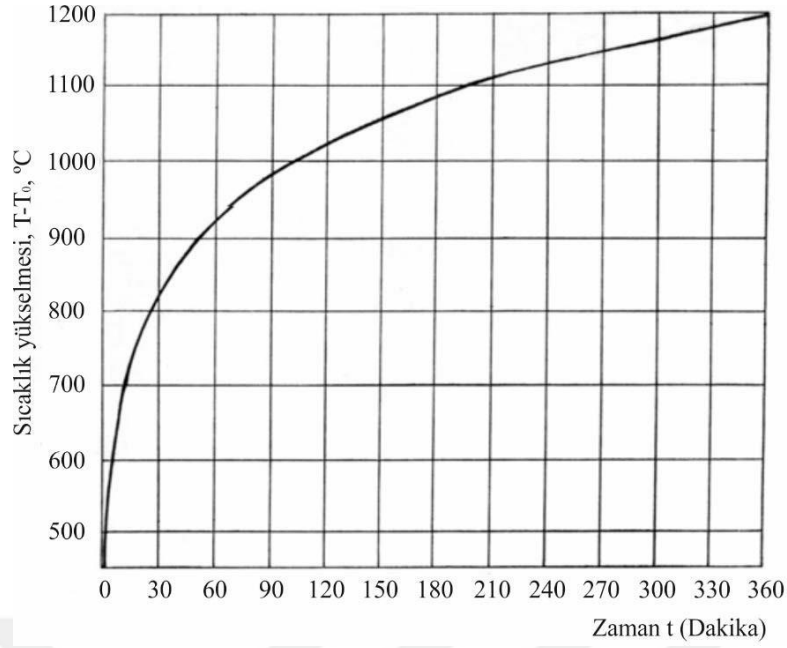
Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır.

Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm-parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm-parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Aköz ve Yüzer, 1994). Şekil 2.1’de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 600 °C’ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C’ye ulaşabileceği görülmektedir, ISO- 834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri (2.1) bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS EN 13501-2, 2009).

$$T-T_0=345\log(8t+1) \quad (2.1)$$

Denklemden, t yangın süresini (dakika), T<sub>0</sub> başlangıç sıcaklığını (20 °C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (Haksever, 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır (TS EN 13501-2, 2009).

2002-2006 yılları arasındaki 5 yılda meydana gelen yangınlara ait istatistikler incelendiğinde, toplam 298092 yangın meydana gelmiş, 1968 insan ve 36089 hayvan can kaybı olmuş, maddi zarar 2006 yılı itibarıyla 1.026.910.790,85 TL şeklinde gerçekleşmiştir. Bu nedenle söz konusu yapılarda yangın güvenliğinin, yürürlükte bulunan çağdaş yönetmeliklerde öngörülen düzeyde, sağlanması gerektiğinden yangın yüklerine göre tasarım da zorunlu olmaktadır.



**Şekil 2.1.** Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi (TS 1263, 1983)

#### 2.1.1.2 Endüstri fırın bacaları

Bazı endüstri fırın bacalarında sıcaklığın 1250-1300 °C'ye ulaştığı bilinmektedir. Günümüzde bacalardaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için ısı esanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak sıcaklık yaklaşık 200 °C' ye kadar düşürülebilmektedir (Avcı, 1984).

#### 2.1.1.3 Hava alanı pistleri

Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196 °C' deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de hava alanının işlevleri kısıtlanır (Ramakrishnan vd., 1991).

#### 2.1.1.4 Nükleer reaktörler

Nükleer reaktörlerde, sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı ve nötron ve gama ışınlarının baskısı ile oluşan sıcaklık nedeniyle, reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez ancak beton sıcaklık

nedeniyle daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisi azalır. Hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji, koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde salıverilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkiler. Sodyum yakma havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400°C’ de başlar ve yarım saat sonra sıcaklık 800 °C ’den daha yüksek bir değere ulaşır (Sakr ve EL-Hakim, 2005).

### **2.1.2 Yüksek sıcaklığın betona etkisi**

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir (Erdoğan, 2003). Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000).

Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Örneğin 600 °C’ye maruz kalan beton, dayanımının % 70’ini kaybetmektedir (Akman, 2000).

Yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan parça atmalar sonucu, donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Bu da yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Riley, 1991; Akman, 2000).

Yüksek sıcaklık altındaki betonun dayanımını etkileyen faktörler çevresel ve malzeme faktörleri olmak üzere iki ana grupta toplanır. Çevresel faktörler ulaşılan en yüksek sıcaklık derecesi, bu sıcaklığa ulaşma hızı, bu sıcaklıkta kalma süresi, soğutma hızı, yükleme koşulları ve soğutma şekilleridir (Sarshar ve Khoury, 1993). Malzeme faktörleri ise kullanılan agrega tipi ve özellikleri, kullanılan çimento tipi ve özellikleri, agrega-çimento hamuru aderansı ve kullanılan mineral katkıların özellikleridir. Beton

yapıların yüksek sıcaklık etkisi altında kalma süresince ve sonrasındaki dayanımını tahmin edebilmek için yüksek sıcaklık etkisinde kalmış betonların dayanım ve şekil değiştirme özelliklerinin iyi anlaşılması gerekir.

Yüksek sıcaklıklar altındaki betonun dayanımda (hem basınç hem de çekme) ve sertliğinde (elastisite modülü) kayıplar oluşur. Bu kayıplarda, serbest suyun yer değiştirmesi ve buharlaşması, bağlanmış ve emilmiş suyun kaybedilmesi, 450 °C’de kalsiyum hidroksitin ayrışması, 575 °C’de kumların çoğunluğunu oluşturan kuvarzın  $\alpha$ -kuvarz’dan  $\beta$ -kuvarz’a geçişi, 400-600 °C’de CSH (kalsiyum silika hidrate) yapıların bozulması gibi etkenler rol oynar (Felicetti ve Gambarova, 1998).

Betonun, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru ve agrega için ayrı ayrı ele alınmıştır.

#### **2.1.2.1 Yüksek sıcaklığın çimento hamuruna etkisi**

Çimento hamuru, betonun ilk ısıtma esnasında çok istikrarsız olan bir bileşenidir. Çünkü önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Yapısındaki serbest su yaklaşık 100-200 °C’ye varan düşük sıcaklıklarda buharlaşır. Yaklaşık 300 °C ve üzerinde yapısındaki bağlı su kaybı ve kimyasal çözülme önemlidir. Isıl etkiler yaklaşık 600 °C’nin üstünde erimeyle sonuçlanarak önem kazanır (Khoury, 1992).

Beton bünyesinde su üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki kalsiyum silikat hidratenin (CSH) katı ögelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin % 4’ü kadar bulunabilen serbest su 100 °C’de, kimyasal bağlı su ise 300 °C’de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000).

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır (Vodak vd., 2004).

Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur. Genellikle, sertleşmiş çimento hamuru 20-200 °C civarında genişler. 200 °C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genişler. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003). 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad ve Shannis, 2004). 600 °C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni büzülen ara bölme duvarlar ve oluşan mikro çatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003).

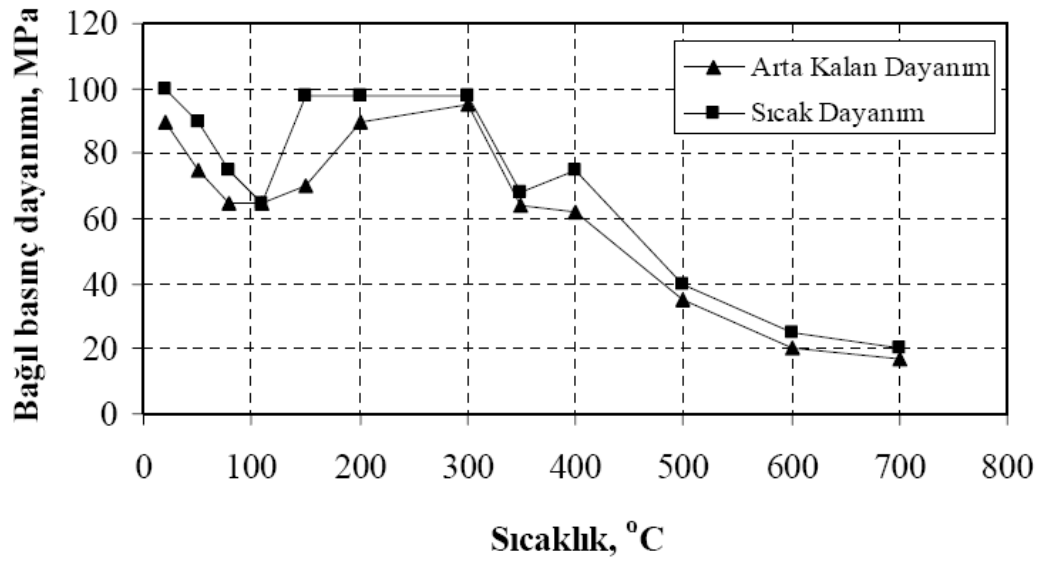
Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikroçatlakların mevcudiyeti, sertleşirken oluşan büzülmenin sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerin etrafındaki mikroçatlaklar da bu sıcaklıkta gelişir. 300 °C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500 °C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0.01 mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0.05 mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Alonso vd., 2003).

Bazı araştırmacılar 100 °C civarında permeabilitede azalma bulmuşlardır. Bu diğer araştırmalarda aynı bölgede düşük basınç dayanımı bulunmasıyla çelişir. Olası tek açıklama artan basınçtan dolayı suyun yoğunlaşmasıdır, çünkü nemli betonun düşük dayanım gösterdiği bilinir. Benzer sıcaklık aralıklarında etrenjitin yok olmasıyla da ilişkili olabilir. Bu olay çok miktarda suyun serbest kalmasını sağlar ve taşıyıcı fazların azaldığı farz edilir (Andrade vd., 2003).

Çimento hamurundaki bir diğer önemli bileşen kalsiyum hidroksittir ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Lea ve Stradling (1922) kalsiyum hidroksitin ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) kirece ( $\text{CaO}$ ) dönüştüğünü ve soğutulduktan sonra kirecin hidratasyonda genleşmesiyle ısıtma süresinde suyun betonda ciddi zararlara yol açabileceğini belirtmişlerdir (Peng vd., 2001). Ayrıca soğutma süresince çatlak gelişimine ve agrega ile çimento hamuru arasında ayrışma olabileceğine dikkat çekmişler ve soğutma hızının etkisini ortaya koymuşlardır. Lea ve Stradling'i (1922) takiben yüksek sıcaklık uygulamalarında betonun en zayıf noktasının kalsiyum hidroksit problemi olduğu anlaşılmıştır (Peng vd., 2001).

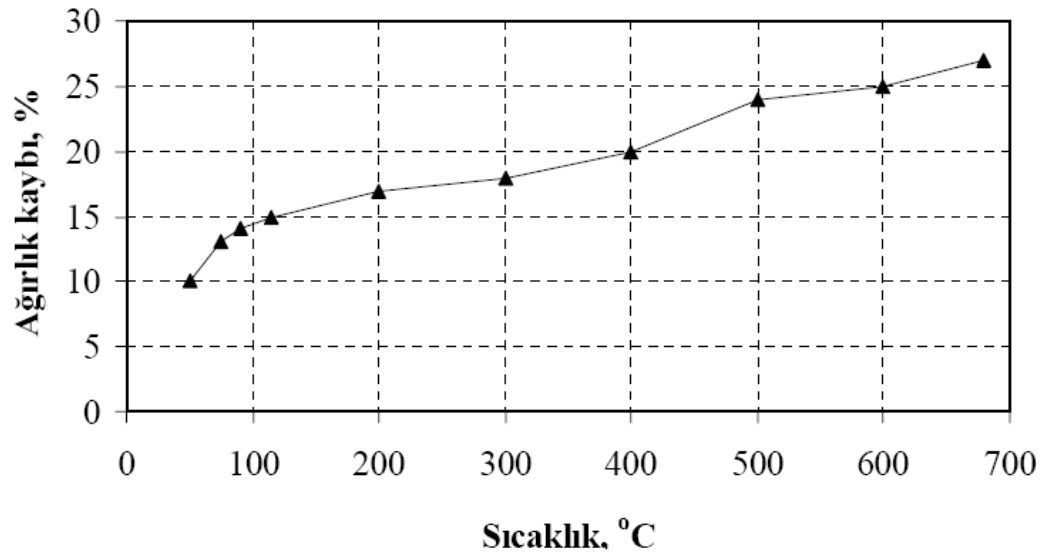
Çimento hamuru % 70-80 tabakalı CSH jeli, % 20  $\text{Ca(OH)}_2$  ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur (Zhang vd., 2002).  $\text{Ca(OH)}_2$ , 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde % 33'e varan bir büzülme oluşur. Yangın sırasında sıkılan su ile  $\text{CaO}$  tekrar  $\text{Ca(OH)}_2$ 'ye dönüşür, bu olay % 44 mertebesinde bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür.  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530 °C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır. Yüksek fırın cürufu ve alüminli çimentolarla üretilen betonlarda  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin az olması nedeni ile bu lekeler daha az olabilir (Akman, 2000).  $\text{Ca(OH)}_2$ 'nin  $\text{CaO}$  ve  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya dönüşümü 500 °C civarında olurken, CSH'nin dehidratasyonu 110 °C'den itibaren başlamaktadır (Scherefle, 2003). Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına neden olur.

Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özelliklerine ilişkin bir araştırma da Dias vd. (1990) tarafından yapılmıştır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi yaklaşık 120 °C'de çimento hamurunun sıcak ve bağıl dayanımları en küçük değerlerdedir. Dayanımın, 50-120 °C aralığında en küçük düzeyde olmasının nedeni olarak, bünyesindeki suyun buharlaşma eğilimi ile hamurun şişerek aderans kaybına yol açtığı düşünülmektedir. Bundan sonra çimento hamurunun 300 °C'ye kadar olan dayanımının iyileştiği görülmektedir.

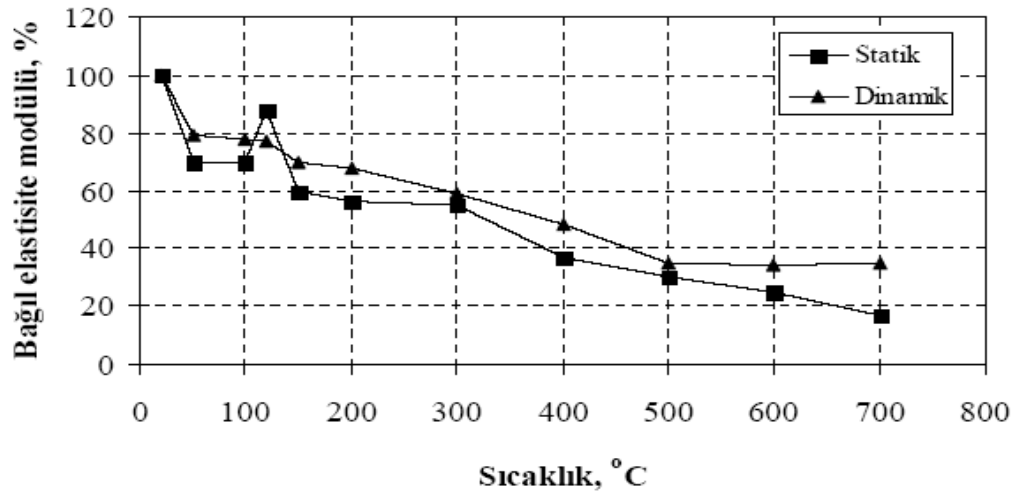


**Şekil 2.2.** Çimento hamurunda dayanım ve sıcaklık ilişkisi (Dias vd., 1990)

Yapılan çalışmalarda, artan sıcaklıkla beraber sertleşmiş çimento hamurunda ağırlık kaybının arttığı (Şekil 2.3), statik ve dinamik elastisite modüllerinin kademeli olarak düştüğü görülmektedir (Şekil 2.4).



**Şekil 2.3.** Çimento hamurunda ağırlık kaybı ve sıcaklık ilişkisi (Dias vd., 1990)



**Şekil 2.4.** Çimento hamurunda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi (Cülfık, 2001)

Morsy vd. (1998) yaptıkları bir çalışmada su yalıtımsız sertleşmiş çimento hamurunun 300 °C'ye yükseltilmiş sıcaklıktaki davranışı konusunda benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Su yalıtımsız sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımında, sıcaklığın 200 °C'ye ulaşması ile bir düşüş olduğunu, 300 °C'ye ulaştığında ise; dayanımın arttığını gözlemlemişlerdir. Basınç dayanımında 22-200 °C aralığında gözlenen ilk düşüş, hamur içindeki su katmanlarının şişmesine ve aderans kaybına yol açmasına bağlanmıştır.

Sıcaklıkla beraber artan basınç dayanımı ise suyu alınmış çimento tanelerinin içsel otoklav denen faktörün eklenmesi ile ortaya çıkan buhar etkisi ile hidrasyonundan kaynaklanmaktadır (Morsy vd., 1998; Cülfık, 2001).

#### 2.1.2.2 Yüksek sıcaklığın agregaya etkisi

Beton agregaları minerallerden oluşmuş taneli malzemelerdir. Kum, çakıl ve kırmataş en çok kullanılan agregalardır. Türk Standartlarına göre, elendiğinde 4.0 mm kare delikli elekten geçen agregaya ince ve bu elek üzerinde kalan agregaya iri agrega denir.

Beton hacminin %60-80'lik kısmını teşkil eden agreganın, ısıtma sürecinde özelliklerindeki değişim betonun performansını büyük ölçüde etkilemektedir (Alonso vd., 2003). Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir.

Yüksek sıcaklıklarda, yaygın olarak kullanılan agregaların pek çoğunda fiziksel ve/veya kimyasal değişimler meydana gelir ve parçalanırlar. Örneğin; nehir çakılı 350 °C civarında içeriğindeki bileşen minerallerin diferansiyel ısı genleşmesi sonucu parçalanır. Agregalarda meydana gelen bu parçalanma, betonda önemli genleşme ve parçalanmaya neden olur (Cülfik, 2001).

Kuvars içerikli agreganın içindeki düşük kuvars 500 °C civarında, yaklaşık % 1 hacim artışı ile beraber dönüşüm fazına girer. Bu etki büyük miktarda kuvarz içeren kum, granit ve bazı şistler gibi agregalarda büyük genleşmelere neden olur. Yaklaşık 550 °C’de çimento hamuru bozulmaya başlar. Hacimdeki artış agreganın genleşmesine, patlamasına ve kabarıp dökülmesine yol açar (Topçu ve Demir, 2007). Agreganın genleşmeleri agrega parçacıklarını çevreleyen hamur içinde çatlakları tetikler. Bu yüzden yüksek sıcaklık etkisinde kalacak beton için agrega seçimi yaparken göz önünde bulundurulması gereken ilk kriter onun hem fiziksel hem de kimyasal yönden ısı istikrarlılığıdır (Lin vd., 1996; Cülfik, 2001).

Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C’ye kadar kararlıdır (Alonso vd., 2003). 800-900 °C’lerde CaO ve MgO’ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO<sub>2</sub>’nin ayrışması, MgO ve CaO’nun oluşması büzölmeye neden olur (Khoury, 1992). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)<sub>2</sub> tekrar oluşur. Bu büzölme ve genleşmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986).

Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250 °C ile 575 °C’ler arasındadır (Perkins, 1986). Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200 °C’de erir (Haddad ve Shannis, 2004). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575 °C’de yaklaşık % 5.7’lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α-kuvarztan β- kuvarza dönüşür (Alonso vd., 2003).

Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000 °C’ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir (Perkins, 1986).

Pomza, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür (Shoaib vd., 2001).

### **2.1.2.3 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliğine etkisi**

Yüksek sıcaklık kütle, yoğunluk, gözeneklilik ve betonun rengi üzerinde bazı değişimlere neden olmaktadır. Fiziksel değişimler sırasında, betonun mekanik özelliklerinde de bazı önemli değişimler ortaya çıkmaktadır.

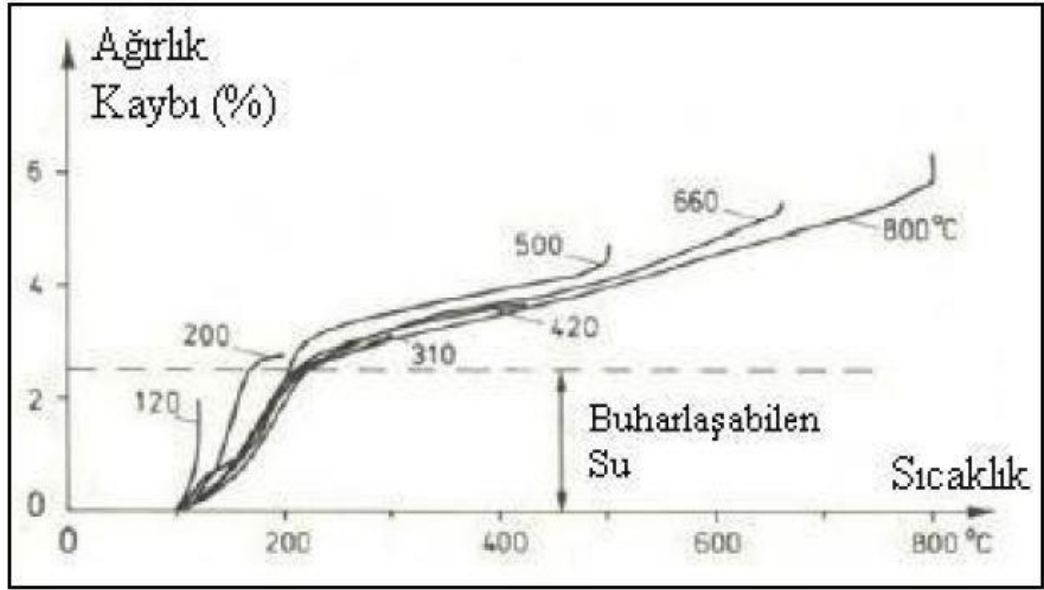
Yerleştirme sırasında beton ıslak, boşluklu bir malzemedir. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 70 °C'de ilk kütlelerinin % 99'a kadarını korumaktadırlar. Betonda bulunan serbest su 70 ile 120 °C arasında buharlaşmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 120 °C'de aynı miktarda su kaybetmektedirler. Kütlelerindeki kayıplar sadece % 1.4 civarındadır. En yüksek kütle kaybı 120 ile 300 °C arasında % 7 civarındadır. Bunun nedeni sertleşmiş betonda bulunan bağlı suyun kurumasıdır. Kütle kaybı 300 ile 600 °C arasında kısmi olarak daha az önem taşımaktadır. Artan sıcaklıklarda yüksek dayanımlı betonlarda kayıp daha azdır. Bunun nedeni büyük olasılıkla yüksek dayanımlı betonun daha az kalsiyum hidroksit içermesidir, bu durum mineral katkıların pozolonik etkisinin sonucudur (Cülfik, 2001).

Betonun yoğunluğu sıcaklık yükselmesi sırasında önemsiz bir değişim sergilemektedir. Bu değişim özellikle serbest suyun buharlaşmasına bağlı olmakla birlikte, ısıl genişlemenin yol açtığı hacim artışıyla da ilişkilidir. Söz konusu düşüş çoğunlukla önemsizmeye değer görülmemektedir. Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genişleme nedeniyle hacim artar (Aköz vd., 1995).

Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd., 2003). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite

etkili bir şekilde artar (Alonso vd., 2003). Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995)

Anderberg-Thelanderson sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agrega ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi Şekil 2.5'te verilmiştir. Schneider ve Bazant yaptıkları çalışmada 1000 °C'ye kadar yoğunluğun % 11-13 arasında azaldığını belirtmişlerdir (Anderberg, 2003).



Şekil 2.5. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi (Anderberg, 2003)

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, mikro yapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar (Alonso vd., 2003).

Betonda gözenek ölçümlerinin verdiği sonuçlara göre, 120 °C'nin altındaki sıcaklıklarda beton boşluk oranının çok az değiştiği görülmüştür. Yüksek performansa sahip betonun kalan toplam gözenekliliği 25, 70 ve 120 °C sıcaklıklarda neredeyse değişmemektedir. Katı mikro yapısı çok fazla değişime uğramamıştır (Cülfik, 2001).

Hem yüksek dayanımlı hem de normal dayanımlı betonlar için boşluk dağılımları artan sıcaklıkla birlikte daha büyük boşluk boyutlarına ulaşarak artmaktadır. Betonun sertleşmiş çimento hamurundaki toplam boşluk oranı 300 °C'den 600 °C'ye kadar normal beton için yaklaşık % 148 ve yüksek dayanımlı beton için % 86 oranında önemli bir şekilde artmaktadır (Cülfik, 2001).

Silikalı ya da kireçtaşı agregadan üretilen betonlar, sıcaklığa bağlı olarak renk değişimi göstermektedir. Bu nedenle de bir yanma sırasında oluşan maksimum sıcaklığa bağlı olarak renk, değişik tonlarda olabilmektedir. Böylece renge bağlı olarak betonda kalan dayanım yaklaşık olarak saptanabilmektedir. Genellikle rengi pembenin ötesine geçen betondan kuşku duyulmalıdır. Gri rengi aşan beton ise, büyük olasılıkla, ufalanabilir ve gözenekli bir yapı kazanmaktadır (Neville, 2000).

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun rengine önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliğin özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk, pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600 °C'ye, gri ise 600-900 °C'ye yükselmiş olduğu önceki çalışmalarda ifade edilmiştir (Neville, 2000; Cioni vd., 2001). Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında betonun, dayanımının % 50'sini, 800 °C'ye ulaştığında ise yaklaşık % 80'ini kaybettiği göz önüne alınırsa (Baradan vd., 2002), renk incelemesi ile betonun maruz kaldığı sıcaklık, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin basınç dayanımındaki değişim için önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır (Yüzer vd., 2003; Yüzer vd., 2004).

Yüzer vd. (2004), Munsell renk dizgesi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarında yüksek sıcaklığın silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara olan etkilerini araştırmış, harçların maruz bırakıldığı her sıcaklık için yüzey rengi ve basınç dayanımları belirlemiş, rengin tür bileşeni ile basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulabileceği sonucunu ortaya koymuşlardır (Yüzer vd., 2004; Topçu ve Demir, 2007).

#### 2.1.2.4 Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkisi

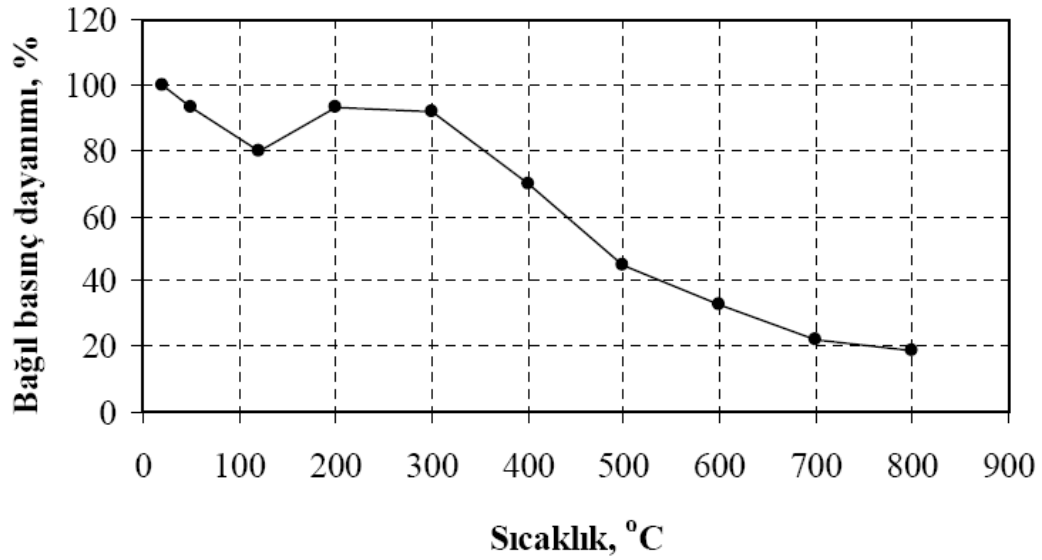
Yüksek sıcaklıklar betonun bileşenlerinin kimyasal ve fiziksel kompozisyonunu değiştirir. Agreg a ve çimento hamurundaki değişikliklere ek olarak, yüksek sıcaklık agreg a ile çimento hamuru arasındaki aderansı bozmaktadır. Bozulan aderans dayanım ve rijitlik kaybına neden olur ve sünmeyi artırır (Felicetti and Gambarova, 1998).

Genel olarak, betonda patlayarak kabuk atma, betonun mekanik özelliklerinde kayıpların artmasına neden olmaktadır. Deneysel sonuçlar 20 °C ile 400 °C arasında değişen sıcaklıklarda basınç dayanımının korunabileceğini veya artabileceğini belirtmiştir (Chan et al., 1999a,b; Luo et al., 2000). Basınç dayanımındaki önemli kayıplar 400 ile 600 °C arasında meydana gelmektedir. Orijinal basınç dayanımının çoğu 600 ile 800 °C arası kaybedilmektedir.

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların arta kalan dayanımların araştırıldığı birçok veri doğal soğutma koşulları altında elde edilmiştir. Ancak su sıkılması, suya daldırma veya su ile söndürme gibi işlemlerin kullanıldığı soğutma şekillerinde bu dayanım kayıpları farklılık göstermektedir. Betonun mekanik özelliklerine soğutma şeklinin etkisi büyüktür. Suyla soğutmaya havada soğutma karşılaştırıldığında, suyla soğutulan beton numunelerin dayanımlarında havada soğutulan numunelerin dayanımlarına göre çok ciddi dayanım azalmaları meydana gelmektedir (Demir A, 2008)

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, agreg a türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000).

Normal dayanımlı betonun yüksek sıcaklıkta tek eksenli basınç dayanımı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. İlk etapta artan sıcaklıkla beraber (120 °C sıcaklığa kadar) meydana gelen düşüşlerden sonra betonun tek eksenli basınç dayanımı artar. Dayanım 200 °C ve üstü sıcaklıklarda tekrar düşmeye başlar. Basınç dayanımı 700 °C'de başlangıç değerine göre % 80 değer kaybeder (Cülfik, 2001).



**Şekil 2.6.** Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi (Yamazaki et al, 1995: Cülfik, 2001)

Normal betonun basınç dayanımı kür koşullarına bağlı olarak değişmezken, yüksek sıcaklıklarda beton dayanımındaki düşüşün nedeni olarak aderans bozulması ve çimento hamurunda kalsiyum silika hidrat jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısı genleşme farklılıkları olarak değerlendirilmektedir (Yamazaki et al, 1995: Cülfik, 2001). Betonda, çimento hamuru ve agregada ortaya çıkan aderans bozulması ve ısı genleşme farklılıkları, beton dayanımının yüksek sıcaklıklarda azalmasına yol açan nedenler arasında kabul edilmektedir.

Genel olarak, ilk başta nemli ve su yalıtımsız betonun basınç dayanımı sıcaklık artışıyla beraber düşer. Dayanım 80-100 °C arasında önemli bir düşüş gösterir. Nem içeriği 20 ile 450 °C arasındaki sıcaklıklarda betonun dayanımında önemli bir rol oynar. Betondaki emilmiş suyun çimento jelini yumuşattığı, veya jel partikülleri arasındaki yüzey güçlerini (Van der Waals güçleri) zayıflattığı, böylece dayanımı azaldığı düşünülür (Lankard and Birkimer, 1971: Cülfik, 2001). Beton basınç dayanımının 100 °C ile 300 °C arasındaki sıcaklıklarda azalması, çimento hamuru boşluklarının suyla dolması sonucu oluşan gerilmelerden kaynaklanmaktadır (Cülfik, 2001).

Yaklaşık 80-100 °C üzerindeki sıcaklıklarda emilmiş su ve ara katmanlardaki su kaçmaya başlar (Feldman and Ramachandran, 1971: Cülfik, 2001). Bunun etkisi yukarıda anlatılan etkinin tersine çevrilmesi şeklinde dayanımın artırılmasıdır.

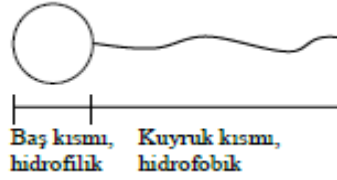
Sıcaklıktaki artışa bağılı olarak dayanımın artması çimento jelinin genel rijitleşmesine ya da emilmiş nemin çıkması nedeniyle parçacıklar arasındaki yüzey güçlerinin artmasına bağlanır. Emilmiş suyun çıktığı ve dayanımın artmaya başladığı sıcaklık, betonun gözenekliliğine bağılı olmaktadır.

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd. 2004)

Shoaib vd. (2001) tarafından agrega olarak ayrı ayrı kum ve iki farklı cüruf kullanılarak üretilen farklı su/çimento oranlarına sahip 7.5x15 cm boyutlu silindir numuneler 600 °C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numunelerde havada soğutulan grupların basınç dayanımındaki azalmanın suda ve fırında soğutulanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atmosferik ortama maruz kalan betonda CaO'nun CaCO<sub>3</sub>'a dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır. Lea ve Straaling betonda 300 °C'ye kadar olan dayanım artışına dikkat çekmişlerdir. Dayanımdaki artış silis esaslı agrega ile üretilen betonlarda daha fazladır ve bunun nedeni çimento ile agrega arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olmasıdır (Savva vd., 2005).

## **2.2 Hava Sürüklenmiş Beton**

Beton teknolojisinde hava sürükleyici katkıları (HSK) olarak adlandırılan yüzey aktif kimyasalların kullanılmasıyla beton içerisinde boyutları 10 µm ile 1 mm arasında değişen küresel hava kabarcıkları oluşmaktadır. Bu hava kabarcıkları beton üretilirken karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı paletlerinin yaptığı mekanik etki sonucu oluşmakta ve HSK molekülleri tarafından kararlılıkları ve stabiliteyi sağlanmaktadır. HSK molekülleri su seven (hidrofilik) baş kısmından ve su sevmeyen (hidrofobik) kuyruk kısmından meydana gelmektedir (Şekil 2.7). Baş kısmın elektriksel yükü negatif (-) ise anyonik, pozitif (+) ise katyonik, nötr ise nan-iyonik ve hem negatif hem de pozitif yüklü ise amfoterik olarak adlandırılırlar (Myers, 2006).

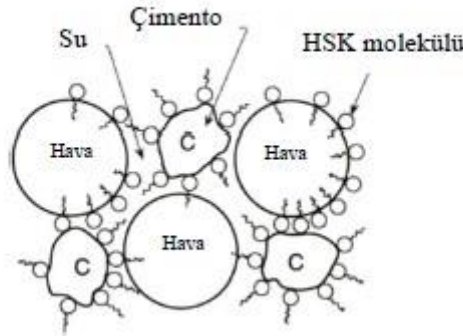


**Şekil 2.7.** Yüzey aktif moleküllerin tipik kimyasal yapısı

### 2.2.1 Hava sürüklenmiş betona hava boşluğu oluşumu

Beton içinde oluşan hava kabarcıkları yüksek içsel basınçtan dolayı büyümekte ve beton yüzeyine ulaştığında ise bu basınç etkisiyle yok olmaktadır. HSK'lar suyun yüzey gerilimini düşürerek kabarcık oluşumunu kolaylaştırmakta ve mekanik deformasyonlara karşı daha kararlı hale getirmektedirler (Whitting ve Nagi, 1998).

Hava kabarcıkları beton içinde birleşerek daha büyük boyutlu kabarcık oluşturabilirler, bunun sonucunda, hem betondan çıkma eğilimleri yüksek olur hem de mekanik etkilere karşı daha dirençsiz olurlar. Whitting ve Nagi (1998) boşlukların stabilitesinin hidrofilik özellikteki baş kısmının çimento tanelerine tutunmasıyla sağlandığını belirtmektedir (Şekil 2.8).



**Şekil 2.8.** HSK moleküllerinin hava, su ve çimento tanelerine tutunmaları

Dodson (1990) hava boşluklarının stabilitesinin elektrostatik itme kuvvetlerinin boşlukları birbirinden ayrı tutmasıyla sağlandığını belirtmektedir. Boşluk yüzeyine adsorplanan HSK molekülleri suda kalan baş kısımları ile boşluk çevresinde film oluşturmaktadır. Moleküller yüklü ise boşlukta aynı yüke sahip olur ve elektrostatik itme kuvvetleri boşlukları birbirinden ayırır ve birleşmelerini engeller.

Bazı araştırmacılar, vinsol reçinesi, sodyum adipat ve sodyum oleat esaslı HSK'ların suyun üzey gerilimini düşürmediğini bu katkıların kalsiyum hidroksit çözeltisi ile reaksiyona girerek çözünmez kalsiyum tuzları oluşturduğunu ve oluşan bu tuzların hava, su ve çimento ara yüzeyinde birikmesiyle hava sürüklemenin gerçekleştiğini ve boşlukların kararlılıklarının sağlandığını belirtmişlerdir (Friberg, 1976; Chatterji, 2003).

### **2.2.2 Hava boşluğu sistemi**

Hava boşluğu sistemi; hava miktarı, hava boşluklarının özgül yüzeyi ve aralık faktörü ile karakterize edilir. Hava miktarı (%), hava hacminin toplam hacme oranıdır. Özgül yüzey ( $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ), hava boşluklarının toplam yüzey alanının hava boşluğu hacmine oranıdır. Aralık faktörü (mm), Çimento hamuru içindeki bir noktanın hava boşluklarının kenarlarına olan ortalama maksimum mesafesidir. Bu parametreler hesaplanırken, bütün hava boşluğu çaplarının aynı olduğu ve çimento hamuru içinde eşit olarak dağıldığı kabul edilmektedir.

### **2.2.3 Sürüklenmiş havanın beton özelliklerine etkisi**

İşlenebilirlik: Hava sürükleme hem hamur hacminin artmasından dolayı, hem de çimento tanesi ile agrega arasındaki sürtünmeyi azaltmasından dolayı işlenebilirliği iyileştirmektedir.

Basınç dayanımı: Hava miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Her %1'lik hava miktarı artışı için basınç dayanımı yaklaşık %6-10 arasında azalmaktadır (Kosmatka vd., 2002).

Elastisite modülü ve eğilme dayanımı: Her %1'lik hava miktarı artışı için betonların elastisite modülü ve eğilme dayanımı değerlerinde yaklaşık %2-6 arasında azalma olmaktadır. Hava sürükleme, sülfat ve alkali silika etkilerine karşı dayanıklılığı artırırken, rötre, sünme, yorulma ve aşınma dayanımlarına çok az etki etmektedir (Camposagrado, 2006).

## 2.2.4 Hava sürüklemeyi etkileyen parametreler

Hava boşluklarının oluşmasını ve kararlılığını çok sayıda parametre etkilemektedir. Bundan dolayı, bu parametreleri birbirlerinden ayrı düşünmek olayı basitleştirir. Bu parametreler;

### 1. Betonlu oluşturan malzemelerin etkileri,

Çimento dozajının artması hava miktarını azaltır. Çimento inceliği arttıkça su ile çevrilen yüzey alanı artmakta, buna karşılık hava boşluğu oluşması için gerekli su miktarı azalmakta ve sonuçta hava sürüklenme güçleşmektedir. Çimento inceliği arttıkça oluşan bu etkilerden dolayı, kullanılacak katkı dozajı artırılarak yeterli hava boşluk sistemi sağlanabilir (Şahin, 2013).

İçme suyundaki kalsiyum karbonat mineralinin, suyun sabun ve deterjan çözme kabiliyetini azaltması sebebiyle hava sürüklemeyi etkileyebileceği düşünülmektedir (Şahin, 2013).

Maksimum tane çapı arttıkça hamur hacmi azalır, bunun sonucunda sürüklenen hava miktarı azalmaktadır. İnce agrega miktarı arttıkça hava kabarcıklarının karışımdan çıkması önlenir.

Süper akışkanlaştırıcılar boşluk yapısını 2 yolla etkiler; i) Hamur akışı kolaylaştıkça boşlukların birleşmesi kolaylaşır. ii) Çimento tanelerinin birbirlerini itme kuvvetini artırır, böylece boşlukların birleşmesini önleyici olan hamur kabuğu zayıflar. Bu etkilerinden dolayı melamin ve naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcılar birkaç istisna hariç, aralık faktörünü artırır, özgül yüzey ve hava miktarını azaltır. Lignosülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcılar yüzey aktif katkılardır yani hava sürükleyici etki yaparlar, fakat oluşan hava boşlukları daha az kararlıdır. Süper akışkanlaştırıcı katkılar sürüklenen hava miktarını azaltırken, boşluk boyut dağılımını etkilememektedir (Şahin, 2013).

Priz geciktirici katkıların hava sürüklemeye belirgin etkileri yoktur. Bu katkıların hava boşluk yapısının değişebileceği zaman aralığını uzatmasından dolayı havanın küçük boşluklardan büyük boşluklara dönüşebileceği düşünülmektedir (Şahin, 2013).

Mineral katkıların hava sürükleme üzerindeki etkileri çimento ile fiziksel olarak benzerdir. Hatta, silis dumanı tane boyutu çimentonunkinden 100 kat daha ince olduğundan daha çok etkiler ve katkı dozajını aşırı arttırmak gerekebilir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun inceliğinin artmasıyla hava miktarı azalmaktadır. Uçucu kül ve silis dumanı karbon içerebilirler. Karbon taze betonda daha kaba boşluklar oluşmasına ve stabilite problemlerine yol açar, çünkü karbon zamanla hava sürükleyici katkıları engelleyerek kademeli olarak hava sürükleyici katkı miktarını azaltmaktadır (Gebler ve Klieger, 1983).

## 2. Karışım kompozisyonu ve karakteristiğinin etkisi,

Bilindiği üzere, S/Ç oranının düşmesiyle boşluk miktarı azalmaktadır. Bunun sebebi ortamda hava boşluğu oluşturacak daha az miktarda su olmasıdır. Bileşimde, hava sürüklemeyi etkileyen en önemli parametre S/Ç oranıdır, hamur ve agrega içerikleri dolaylı etkimektedir. Çimento dozajının artması ise hava miktarını azaltmaktadır. S/Ç oranının azalmasıyla daha viskoz hale gelen hamurda, hava boşluklarının birleşme riski azalır. Bunun sonucunda hava boşluklarının boyutları da azalmaktadır.

Su/çimento oranı 0,25 gibi çok düşük olduğunda hava sürüklemek muhtemeldir. Fakat, çok miktarda süper akışkanlaştırıcı içerirdiklerinden 200 µm boşluk faktörü elde etmek zordur. Bundan dolayı, hava sürükleyici dozajı normalin 10 katına erişmektedir (Aitcin vd., 1993).

Çökme (slump) hava sürüklemeyi kontrol etmede önemli bir parametre olarak belirtilmektedir. Çökme az, rijitlik fazla, hava sürükleme zor ve çökme fazla, hamur akışkan, hava boşluklarının birleşme riski yüksek ilişkileri kurulabilir. Ama, çökmenin etkisi dolaylı olduğundan (su içeriğine ve S/Ç'ye bağlı) değerlendirme yapmak zordur.

Taze beton sıcaklığı birçok katkı üreticisine göre hava miktarını doğrudan etkilemektedir. Aynı katkı dozajında sıcaklığı düşük olan beton daha fazla hava içermektedir.

3. Dış etkenler (karıştırma, yerleştirme, yüzey düzeltme) 'dir.

Genelde karışım süresi arttıkça daha homojen bir karışım elde edileceği düşünülmektedir. İyi karıştırıcılar büyük boşlukları ufaltarak daha küçük boşluklar oluşturur.

Sıkıştırma ve yerleştirme işlemleri beton içinde istenmeyen boşlukları atmak amacıyla yapılmaktadır. Vibrasyon büyük boşlukları ve hapsolmuş havayı attığından yeterli hava sürüklenmiş betonda aralık faktörünü az miktarda etkilemektedir (Simon vd., 1992).

Pompalama hava miktarının % 2-3 mertebelerinde azaltabilirken, aralık faktörünü değiştirmez ve donma-çözülme dayanıklılığına çok az etki eder. Uzun mesafelere pompalama hava miktarını azaltır. Aralık faktörü üzerinde etkisi için yeterli veri bulunmamaktadır.

Yüzey düzeltme işlemlerinin yüzey boşluk yapısında meydana getirdiği değişiklikler üzerinde çok az bilgi vardır. Tahta mala ile yapılan hafif düzeltme en iyi yöntem olarak önerilmektedir. Çelik mala ile yapılan aşırı düzeltme hava boşluklarını yok ettiği için pullanma dayanımını azaltmaktadır.

## BÖLÜM III

### MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları, numune boyutları ve bu numuneler üzerinde yürütülen deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

#### 3.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimento, agrega ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmıştır.

##### 3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, Niğde ÇİMSA Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TS EN 197–1 (2012) ile uyumlu CEM I 42,5 R portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilmiş ve nem almayacak şekilde koruyucu kaplarda korunmuştur. Kullanılan çimentoya ait fiziksel özellikler Çizelge 3.1.’de, kimyasal özellikler ise Çizelge 3.2.’de verilmiştir. Bu değerler ÇİMSA Niğde Çimento Fabrikası’ndan alınmıştır.

**Çizelge 3.1.** Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

|                                    |                                        |       |
|------------------------------------|----------------------------------------|-------|
| Özgül Ağırlık ( $\text{gr/cm}^3$ ) |                                        | 3.10  |
| Priz süresi                        | İlk (Dakika)                           | 150   |
|                                    | Son (Dakika)                           | 205   |
| İncelik                            | Özgül yüzey( $\text{cm}^2/\text{gr}$ ) | 3475  |
|                                    | 0.040 mm elek kalıntı(%)               | 11.18 |
|                                    | 0.090 mm elek kalıntı(%)               | 0.85  |
| Basınç Dayanımı (MPa) 2 günlük     |                                        | 25.70 |
| Basınç Dayanımı (MPa) 7 günlük     |                                        | 39.72 |
| Basınç Dayanımı (MPa) 28 günlük    |                                        | 48.85 |

**Çizelge 3.2.** Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

| Kimyasal bileşenler | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | Cl   | SO <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | K.K  |
|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-----------------|-------------------|------------------|------|
| Miktar (%)          | 19.85            | 5.19                           | 3.02                           | 63.85 | 1.33 | 0.02 | 2.99            | 0.62              | 0.85             | 1.75 |

**3.1.2 Agreg**

Deneysel çalışmalarda, Nevşehir ili, Kızılırmak üzerindeki kum ocaklarından temin edilen dere kumu ve Niğde Başmakçı Bölgesi'nden temin edilen kalker esaslı kırma kum olmak üzere iki farklı tip ince agreg kullanılmıştır. Kaba agreg olarak ise Niğde Başmakçı Bölgesi'nden elde edilen kalker esaslı kırma taş agreg kullanılmıştır. Beton karışımında kullanılan agreganın maksimum tane çapı 8 mm'dir. Agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6 (2002)'ya göre bulunmuş olup, ince ve iri agreganın özgül ağırlıkları sırasıyla Agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6'ya (2002) göre tespit edilmiş olup Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Karışımında kullanılan agregaların her birine ait elek analizleri ise Çizelge 3.4, 3.5, ve 3.6'da verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

| Fiziksel özellik     | Dere kumu | Kırma kum | Kaba agreg |
|----------------------|-----------|-----------|------------|
|                      | 0-5       | 0-5       | 5-12       |
| Özgül ağırlık, (DYK) | 2.47      | 2.55      | 2.66       |
| Su emme yüzdesi, (%) | 2.60      | 2.20      | 0.90       |

**Çizelge 3.4. Dere kumu elek analizi sonucu**

| Elek<br>açıklığı(mm) | Elek üzerinde<br>kalan(gr) | Elek üzerinde<br>kalan(%) | Kümülatif<br>kalan(%) | Elekten<br>geçen(%) |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| 16                   | 0,00                       | 0,00                      | 0,00                  | 100,00              |
| 11.2                 | 0,00                       | 0,00                      | 0,00                  | 100,00              |
| 8                    | 197                        | 9,85                      | 9,85                  | 90,15               |
| 5.6                  | 53                         | 2,65                      | 12,50                 | 87,50               |
| 4                    | 400                        | 20,00                     | 32,50                 | 67,50               |
| 2                    | 416                        | 20,80                     | 53,30                 | 46,70               |
| 1                    | 213                        | 10,65                     | 63,95                 | 36,05               |
| 0.5                  | 284                        | 14,20                     | 78,15                 | 21,85               |
| 0.25                 | 278                        | 13,90                     | 92,05                 | 7,95                |
| 0.125                | 95                         | 4,75                      | 96,80                 | 3,2                 |
| 0.063                | 49                         | 2,45                      | 99,25                 | 0,75                |
| Tava                 | 15                         | 0,75                      | 100,00                | 0                   |
| Toplam               | 2000                       |                           |                       |                     |

**Çizelge 3.5. Kırma kum elek analizi sonucu**

| Elek<br>açıklığı(mm) | Elek üzerinde<br>kalan(gr) | Elek üzerinde<br>kalan(%) | Kümülatif<br>kalan(%) | Elekten<br>geçen(%) |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| 16                   | 0,00                       | 0,00                      | 0.00                  | 100.00              |
| 11.2                 | 0,00                       | 0,00                      | 0.00                  | 100.00              |
| 8                    | 10                         | 0,50                      | 0.50                  | 99.50               |
| 5.6                  | 40                         | 2,00                      | 2.50                  | 97.50               |
| 4                    | 218                        | 10,90                     | 13.40                 | 86.60               |
| 2                    | 680                        | 34,00                     | 47.40                 | 52.60               |
| 1                    | 408                        | 20,40                     | 67.80                 | 32.20               |
| 0.5                  | 199                        | 9,95                      | 77.75                 | 22.25               |
| 0.25                 | 171                        | 8,55                      | 86.30                 | 13.70               |
| 0.125                | 79                         | 3,95                      | 90.25                 | 9.75                |
| 0.063                | 155                        | 7,75                      | 98.00                 | 2.00                |
| Tava                 | 40                         | 2,00                      | 100.00                | 0.00                |
| Toplam               | 2000                       |                           |                       |                     |

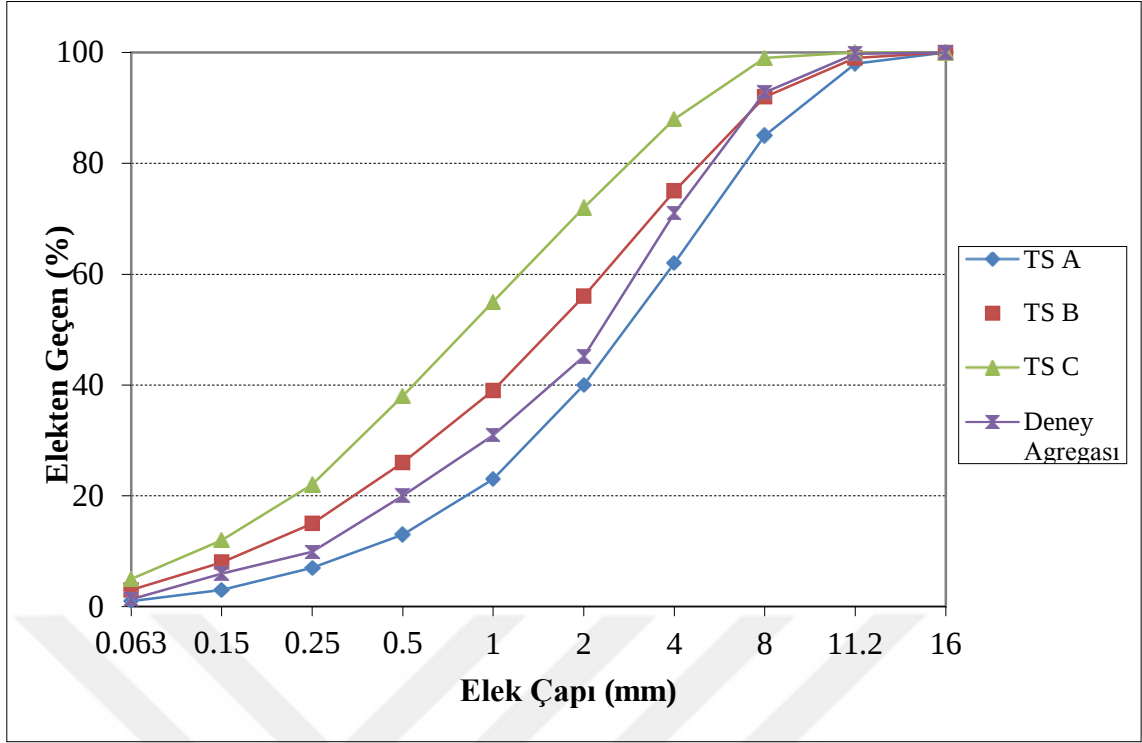
**Çizelge 3.6.** İri agrega elek analizi sonucu

| Elek<br>açıklığı(mm) | Elek üzerinde<br>kalan(gr) | Elek üzerinde<br>kalan(%) | Kümülatif<br>kalan(%) | Elekten<br>geçen(%) |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| 16                   | 0                          | 0.00                      | 0.00                  | 100.00              |
| 11.2                 | 40                         | 2.00                      | 2.00                  | 98.00               |
| 8                    | 467                        | 23.35                     | 25.35                 | 74.65               |
| 5.6                  | 566                        | 28.30                     | 53.65                 | 46.35               |
| 4                    | 600                        | 30.00                     | 83.65                 | 16.35               |
| 2                    | 239                        | 11.95                     | 95.60                 | 4.40                |
| 1                    | 43                         | 2.15                      | 97.75                 | 2.25                |
| 0.5                  | 11                         | 0.55                      | 98.30                 | 1.70                |
| 0.25                 | 7                          | 0.35                      | 98.65                 | 1.35                |
| 0.125                | 0                          | 0.00                      | 98.65                 | 1.35                |
| 0.063                | 0                          | 0.00                      | 98.65                 | 1.35                |
| Tava                 | 27                         | 1.35                      | 100.00                | 0.00                |
| Toplam               | 2000                       |                           |                       |                     |

Yukarıda elek analizleri verilen agregalar TS 802’de (2009) agrega en büyük dane büyüklüğü 8,0 mm olan beton için belirtilen agrega dane büyüklüğü dağılımı eğrisine ait sınırlar içerisinde kalacak şekilde karıştırılmıştır. Karışımın elek analizi sonuçları Çizelge 3.7’de, granülometri eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.7.** Kullanılan agreganın granülometrisi

| Elek Açıklığı<br>(mm) | Elekten Geçen (%)    |            |           | Kullanılan Agrega |
|-----------------------|----------------------|------------|-----------|-------------------|
|                       | TS 706 EN 12620 + A1 |            |           |                   |
|                       | Alt Limit            | Orta Limit | Üst Limit |                   |
| 16                    | 100                  | 100        | 100       | 100               |
| 11,2                  | 98                   | 99         | 100       | 99.8              |
| 8                     | 85                   | 92         | 99        | 92.8              |
| 4                     | 62                   | 75         | 88        | 71.0              |
| 2                     | 40                   | 56         | 72        | 45.1              |
| 1                     | 23                   | 39         | 55        | 30.9              |
| 0,5                   | 13                   | 26         | 38        | 20.0              |
| 0,25                  | 7                    | 15         | 22        | 9.9               |
| 0,125                 | 3                    | 8          | 12        | 6.0               |
| 0,63                  | 1                    | 3          | 5         | 1.4               |



Şekil 3.1. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

### 3.1.3 Hava sürükleyici katkı malzemesi

Çalışmada beton karışımlarına hava sürüklemek amacıyla TS EN 934-2 (2011)'e uygun sıvı halde hava sürükleyici katkı malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan katkı malzemesi 1.01 kg/litre yoğunlukta ve açık sarı renktedir.

### 3.1.4 Karışım ve bakım suyu

Su betonun içerisinde iki önemli görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi; çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer almasını sağlamak, ikincisi ise, betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır. Ayrıca kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylece, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli miktarda suyun bulunmasını sağlamak gibi bir görevi daha vardır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kür suyunun kalitesi, beton karışımında yer alacak suyun kalitesi kadar önemli olmasa da, kür suyu olarak

kullanılacak suyun içinde de betonda zararlı kimyasal olaylara yol açacak veya betonun yüzeyinin lekelenmesine neden olabilecek yabancı maddelerin yer almaması gerekmektedir (TS EN 196-1,2009).

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu şehir şebekesinden alınan içme suyudur. Beton karışım ve bakım suyunun kalitesi ile ilgili özel bir Türk Standardı yoktur. Çeşitli kaynaklarda karma suyu genel anlamda içilebilir su olarak ifade edilmektedir.

### 3.2 Beton Karışım Oranları

Beton karışım hesabı TS 802’de (2009) belirtilen mutlak hacim metoduna göre yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan su-çimento (s/ç) oranı 0.565’tir. Öncelikle şahit karışımın malzeme miktarları belirlenmiş daha sonra şahit karışımın çimento miktarı ve su-çimento oranı sabit tutularak %0.025, %0.050, %0.075 ve %0.1 hava sürükleyici katkı ilavesi yapılmış ve böylece şahit karışımla birlikte toplam 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda kıvam düzenlemesi yapılmamış böylece hava sürükleyici katkının kıvama etkisi gözlenmiştir. Bir metreküp beton numune içinde bulunan malzeme miktarları Çizelge 3.8’de verilmiştir.

**Çizelge 3.8.** Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları

| Karışım Kodu | Çimento (Kg) | Su (Kg) | Doğal Kum (Kg) | Kırma Kum (Kg) | Kırma Çakıl (Kg) | Hava Sürükleyici (%) |
|--------------|--------------|---------|----------------|----------------|------------------|----------------------|
| K0           | 400          | 226     | 682            | 682            | 151              | 0                    |
| K1           | 400          | 226     | 659            | 659            | 146              | 0.025                |
| K2           | 400          | 226     | 637            | 637            | 141              | 0.050                |
| K3           | 400          | 226     | 614            | 614            | 136              | 0.075                |
| K4           | 400          | 226     | 575            | 575            | 128              | 0.100                |

### 3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Beton üretiminde, Fotoğraf 3.1’de görülen dram tipi beton mikseri kullanılmıştır. Beton mikserinin içerisine önce kaba ve ince agregalar konularak karışım homojen hale gelinceye kadar mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra çimento ilave edilmiş ve homojenlik sağlanıncaya kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Karma suyunun bir kısmı beton

karışımına ilave edilerek bir miktar karıştırılmış ve son olarak daha önce karma suyunun bir kısmı ile karıştırılarak hazırlanmış olan hava sürükleyici katkı mikser çalışır haldeyken ilave edilmiştir.



**Fotoğraf 3.1.** Taze betonun hazırlanması

TS EN 206-1/A1'e (2005) uygun olarak hazırlanan beton numuneleri Fotoğraf 3.2'de görüldüğü gibi 10x10x10 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yaş birim ağırlıkları ölçülen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve  $20 \pm 2$  °C sıcaklıktaki kür havuzuna konularak basınç deneyi yapılacak zamana kadar bekletilmiştir.



**Fotoğraf 3.2.** Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali

Üzerinde yüksek sıcaklık testleri yapılacak olan numuneler ise; 28 gün süre ile  $20 \pm 2$  °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletildikten sonra,  $100 \pm 5$  °C sıcaklıktaki etüvde 24 süre ile bekletilmiş ve tamamen kuruması sağlanmıştır. Etüvde kurutulan numuneler 30 gün boyunca  $23 \pm 2$  °C sıcaklıktaki ve %  $45 \pm 5$  bağıl nemli laboratuvar ortamında deney zamanına kadar bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklık sonrası, basınç dayanımı ve p-dalga hızı deneylerini gerçekleştirmek için her bir karışımdan 27 adet numune hazırlanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın betonun mikro yapısına ve agrega-çimento hamuru ara yüzeyine etkisinin incelenebilmesi için 500 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerden her bir beton karışımından ikişer tane olmak üzere toplam 10 adet numune daha hazırlanmıştır.

### **3.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar**

#### **3.4.1 Taze beton birim hacim ağırlığının belirlenmesi**

Beton karışımları taze haldeyken yaş ağırlıkları ölçülmüş ve taze beton birim hacim ağırlıkları tespit edilmiştir.

### 3.4.2 Yayılma tablası deneyi

Hazırlanan karışımların kıvamlarının ölçülmesi amacıyla numuneler üzerinde yayılma tablası deneyine yapılmıştır. TS EN 12350-5 (2010)'e uygun şekilde Fotoğraf 3.3'de görülen deney ekipmanı kullanılarak, yayılma tablasında betonun birbirine dik yönde iki uzunluğu ölçülüp ortalaması alınarak kayıt edilmiştir.



**Fotoğraf 3.3.** Yayılma tablası deneyi

### 3.4.3 Hava muhtevasının tayini deneyi

Taze beton numunelerinin içerdiği hava miktarının tayin edilmesi amacıyla numuneler üzerinde TS EN 12350-7 (2010) uygun şekilde hava muhtevası tayini deneyi yapılmıştır. Her bir karışım için hava miktarı 3 defa ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır. Numuneler üzerinde yürütülen hava muhtevası tayini deneyi Fotoğraf 3.4'te görülen deney aleti kullanılarak yapılmıştır.



**Fotoğraf 3.4.** Betonda hava muhtevası ölçmesi için kullanılan deney aleti

#### **3.4.4 Basınç dayanımı**

10x10x10 cm boyutlu beton numuneler, TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak 3, 7, 28, ve 90. günlerde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, Fotoğraf 3.5'te görülen 3000 kN kapasiteli basınç aletinde yaklaşık 0.5 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir.



**Fotoğraf 3.5.** Basınç dayanımı test cihazı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak numuneler ise 28 gün standart kür havuzunda bekletilip etüvde kurutulduktan ve bir ayda laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra sıcaklık artış hızı 8 °C/dk olan Fotoğraf 3.6’da görülen elektrikli fırına yerleştirilerek 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmışlardır. Belirtilen sıcaklık değerinde 2 saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler havada ve suda olmak üzere iki farklı soğutma yöntemi ile soğutulmuştur. Her bir sıcaklık değeri için her karışımdan 3’ü havada 3’ü suda soğutulmak üzere 6 numune kullanılmıştır. Havada soğutulan numuneler soğumanın yavaş olması amacıyla Fotoğraf 3.7’de görüldüğü gibi laboratuvar ortamına bırakılmıştır. Diğer numuneler ise Fotoğraf 3.8’de görüldüğü gibi su içerisinde hızlı soğutma yöntemi ile soğutulmuştur. Daha sonra bu numunelerin basınç dayanım değerleri bulunarak, sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları (3.1) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (3.1)$$

Burada:

$f_c$ : Basınç dayanımı

P: Preste kırılma anında okunan en büyük yük

A<sub>c</sub>: Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı



**Fotoğraf 3.6.** Deney numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması



**Fotoğraf 3.7.** Numunelerin havada soğutulması



**Fotoğraf 3.8.** Numunelerin suda soğutulması

#### **3.4.5 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi**

Yangın sonrası ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi amacıyla; 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan beton numunelerde, ASTM C 597-09'ye (2009) uygun 0,1 µs duyarlıklı ultrases aleti ile ses geçiş hızı (V) km/sn cinsinden ölçölmüştür. Ses geçiş hızının ölçölmesinde numune yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine ultrason jeli sürölmüş 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Fotoğraf 3.9'da göröldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş hızı okunmuştur. Problar yer değıştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınmıştır.



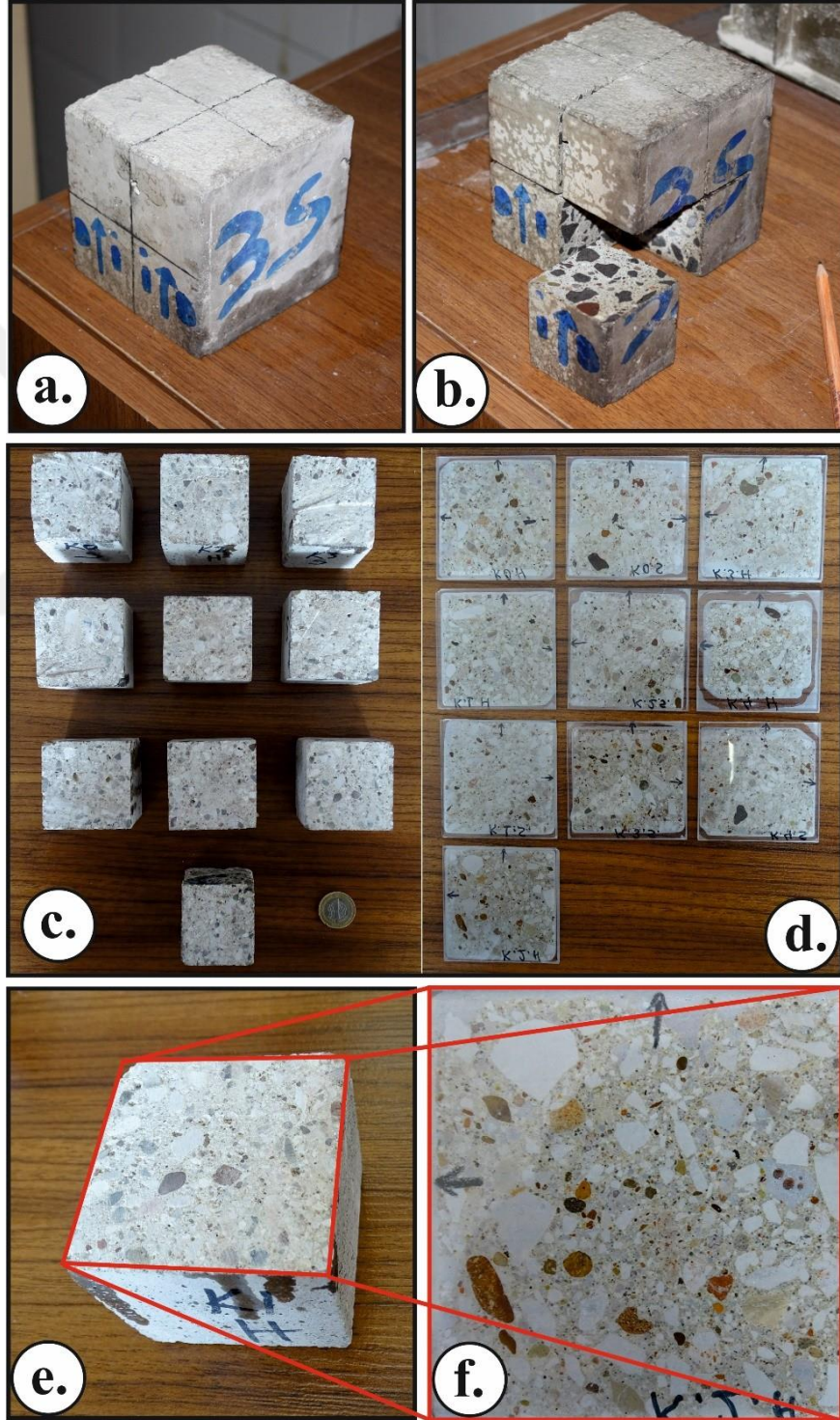
**Fotoğraf 3.9.** Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi

#### **3.4.6 Mineral ve doku değişimlerinin mikroskobik analizi**

Farklı oranlarda hava sürükleyici katkı kullanılarak hazırlanan (%0.025, %0.050, %0.075 ve %0.1) ve 500 °C ısıya maruz bırakılmış betonlardaki dokusal değişim farklılıkları makroskobik olarak tanımlanamamıştır. Doku değişimlerini mikroskobik boyutta tanımlayabilmek için mineroloji, petroğrafi ve birçok alanda yaygın olarak kullanılan polarizan (alttan aydınlatmalı) mikroskop analiz tekniği kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan %4, %6, %8, %10 ve %13.5 oranlarında hava içeren betonlardan aşığıdaki adımlar izlenerek 0.030 mm kalınlığında ince kesitler hazırlanmıştır.

### 3.4.6.1 İnce kesitlerin hazırlanması

10x10x10 boyutlarında (Fotoğraf 3.10 a) hazırlanan beton numunelerden pratikte ince kesit yapmak mümkün olmadığı için öncelikle boyut indirgemesi yapılmıştır. Laboratuvarıda taş kesme makinesiyle 1/8 oranında boyutları indirgenerek yaklaşık 5x5x5 boyutlarında küp numune elde edilmiştir. (Fotoğraf 3.10 b,c).

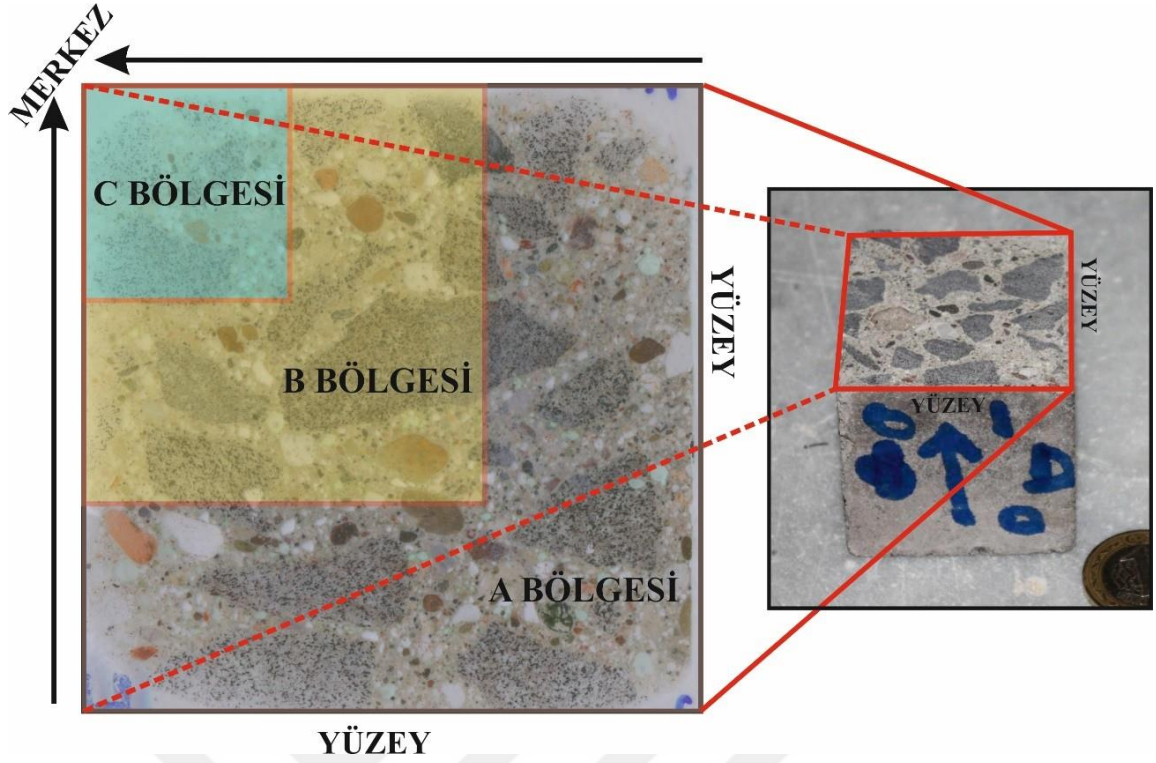


**Fotoğraf 3.10.** Numunelerin boyut indirgemesi ve ince kesit hazırlama süreci

Özellikle suda soğutulan beton numuneleri zayıf olabileceği düşüncesiyle ince kesit yapımı sırasında dağılma olmaması için numune yüzeylerine reçine emdirilmesi yapılmıştır. Boyut indirgemesi yapılan numuneler etüvde kurutulmuş ve boşluklarda hapsedilmiş nemin ortamı terk etmesi için çeker ocak altında aseton uygulaması yapılmıştır. Hazır hale getirilen küp numunelerin kesit yapılacak yüzeyleri üzerine reçine karışımı (1000 ml Vestopal, 250 ml Styrene, 3 ml Chclohexanonperoxid, 1 ml Cobalt octat) ilave edilmiştir. Karışımı ilave edilen numuneler daha sonra vakum desikatörü içerisine alınmış, hazırlanan reçinenin beton yüzeyi üzerinde bulunan boşluk, çatlak gibi süreksizlikleri doldurması için reçine ile 5 barlık ters basınç altında doldurulması sağlanmıştır. Bu işleme reçine yüzeylerinde kabarcık görünmeyene kadar yaklaşık 2 gün süreyle kademeli olarak devam edilmiştir. Reçine işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığında kurumaya bırakılan numuneler bu süre sonunda 40 °C'ye ayarlı etüvde 2 gün süreyle bekletilmiş böylece tamamen sertleşmesi sağlanmıştır. Kenar etkileşiminden kaçınmak, dış yüzeyden iç merkeze doğru dokusal değişimi daha net olarak gözlemleyebilmek için numunelerin kalıp yüzeylerinden değil kesilme yüzeylerinden ince kesitler yapılmıştır (Fotoğraf 3.10 d, e, f). Çalışmada her bir grup numune için birer adet olmak üzere toplamda 10 adet ince kesit yapılmıştır.

#### **3.4.6.2 İnce kesitlerin bölgelere ayrılması**

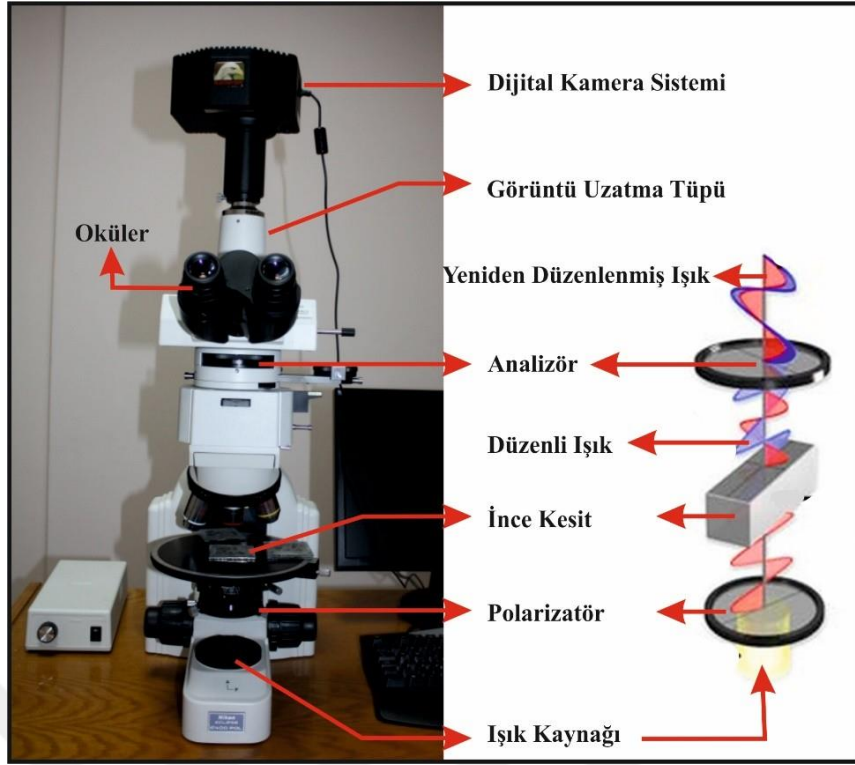
Isıya maruz kalan beton numunelerinin dış yüzeyleri iç yüzeylere kıyasla daha fazla etkilenecektir. Bu etkinin dokusal yansımaları ortaya koyabilmek amacıyla ince kesitler dış yüzeyden merkeze doğru A, B, C, D olmak üzere dört farklı bölgeye ayrılmıştır (Fotoğraf 3.10). Makroskobik olarak numuneler arasındaki dokusal farklılaşma 1-3 mm'lik kenar kısımlarda yoğunlaştığı için bu bölge diğer bölgelere göre daha ince tutulmuştur. Dokusal farklılaşmaya bağlı agrega, matriks, aderans gibi değişimlerin polarizan mikroskop altındaki karşılaştırılmaları bu bölgelere göre yapılmıştır.



**Fotoğraf 3.11.** İnce kesit yapılmış numunelerin bölgelere ayrılması

#### 3.4.6.3 Polarizan mikroskop analizi

Petrografi biliminde mineraller ışığı geçiren şeffaf mineraller ve ışığı geçirmeyen opak mineraller olmak üzere iki gruba ayrılır. Işığı geçiren minerallerin analizinde polarizan mikroskop adı verilen alttan aydınlatmalı mikroskop kullanılır (Fotoğraf 3.12). Polarizan mikroskop günümüzde doğal ve endüstriyel minerallerin analizi başta olmak üzere çimento sektörü, seramik endüstrisi, mineral lifleri, ağaç endüstrisi gibi malzeme mühendisliğini ilgilendiren birçok alanda anizotrop numunelerin sayısal ve doku analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı yönlerde titreşen normal ışık polarizatörden geçtikten sonra 0.030 mm kalınlıkta inceltilmiş numuneden geçer, analizatörden geçtikten sonra tek bir yönde titreşim yapan ışık göze ulaşır. Göze gelen ışık içinden geçtiği numunenin optik özelliklerine göre farklı renk ve dokuda gözlenir. Polarizen ışığın bu özelliği kullanılarak malzemelerin mineral ve doku özellikleri analiz edilir. Bu çalışmada Lica marka polarizen mikroskop kullanılmıştır.



**Fotoğraf 3.12.** Polarizan mikroskop

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 4.1 Taze Beton Birim Hacim Ağırlığı

Yapılan deneysel çalışma sonucunda K0, K1, K2, K3 ve K4 karışımlarına ait taze beton birim hacim ağırlıkları sırasıyla 2265, 2210, 2155, 2115 ve 2030 kg/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Buradan görüldüğü gibi taze betonun içerisindeki hava miktarı arttıkça betonun birim hacim ağırlığı düşmektedir. Bu beklenen bir durumdur (Erdoğan, 2003).

#### 4.2 Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deney metodu betonun kıvam tayini seçeneklerinden biridir. Betonun kıvamı, işlenebilirliği betonun karakteristik özellikleri kadar büyük önem taşımaktadır. Bu deney yöntemi özellikle çökme deneyinde tamamen çökmenin elde edildiği yüksek ve çok yüksek işlenebilirliğe sahip karışımların değerlendirilmesinde kullanılır (Baradan vd., 2012). Bu çalışmada hem beton numunelerinin kıvamını ölçmek hem de sürüklenmiş havanın beton kıvamına etkisini belirlemek amacıyla yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.1’de her karışıma ait yayılma tablası deney sonuçları sunulmuştur.

**Çizelge 4.1.** Karışımlara ait yayılma tablası deney sonuçları (cm)

| Karışım | K0 | K1 | K2 | K3 | K4 |
|---------|----|----|----|----|----|
| Yayılma | 49 | 49 | 46 | 45 | 47 |

Yayılma tablası deney metodu da betonun kıvam tayini seçeneklerinden biridir. Çizelge 4.1’de her karışıma ait yayılma tablası deney sonuçları sunulmaktadır. Çizelge 4.1 incelendiğinde, yayılma değerlerinin 45 ile 49 cm arasında değiştiği gözlenmiştir. Sürüklenmiş hava miktarının betonun yayılma değerine fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

#### 4.3 Hava Muhtevasının Tayini Deneyi

Deneysel çalışma kapsamında üretilen betonların içerisine hava sürükleyici katkı maddesi kullanılarak çapları 0.05 ile 0.25 mm arasında değişen hava kabarcıkları sürüklenmiştir. Sürüklenmiş hava betonun donma çözülme direncini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır (Baradan vd., 2012). Ancak bu çalışmada, betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki direncini arttırmak amacıyla, taze beton içerisine hava sürüklenmiştir. Yürütülen bu tez çalışması kapsamında üretilen karışımlara ait hava miktarları ölçülüp değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** Karışımlara ait hava muhtevası değerleri (%)

| Karışım                            | K0  | K1    | K2    | K3    | K4    |
|------------------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|
| Hava Sürükleyici Katkı Miktarı (%) | 0   | 0.025 | 0.050 | 0.075 | 0.100 |
| Hava Muhtevası                     | 3.8 | 5.8   | 7.9   | 10.1  | 13.5  |

Çizelge 4.2 incelendiğinde, karışımların hava muhtevalarının % 3.8 ile %13.5 arasında değiştiği görülmektedir. Hava sürükleyici katkı miktarı arttıkça sürüklenmiş hava miktarı da artmıştır. Bu beklenen bir durumdur.

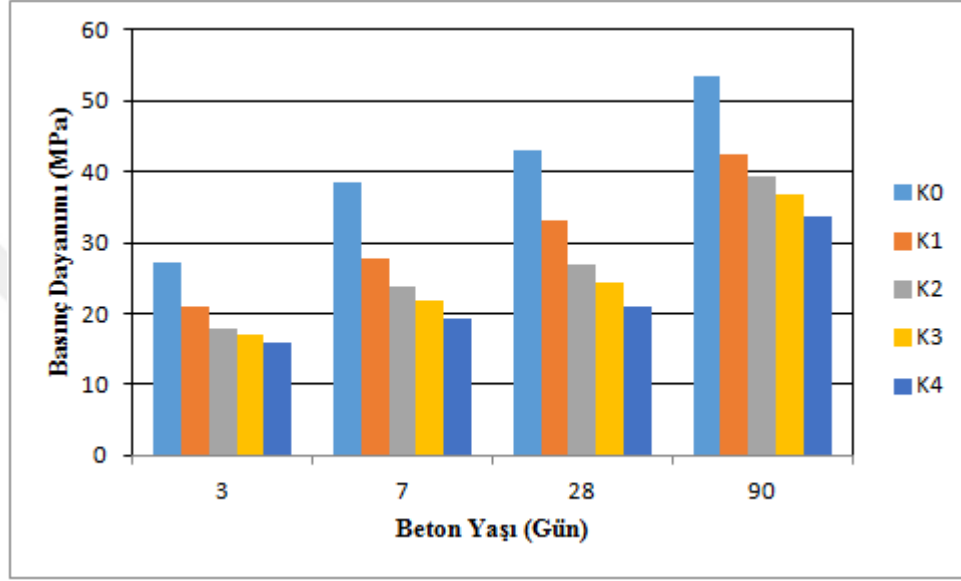
#### 4.4 Basınç Dayanımı

Deneysel çalışma kapsamında üretilen 5 farklı karışıma ait 3, 7, 28 ve 90 günlük küp numunelere ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** Çalışmada kullanılan betonların basınç dayanımları (MPa)

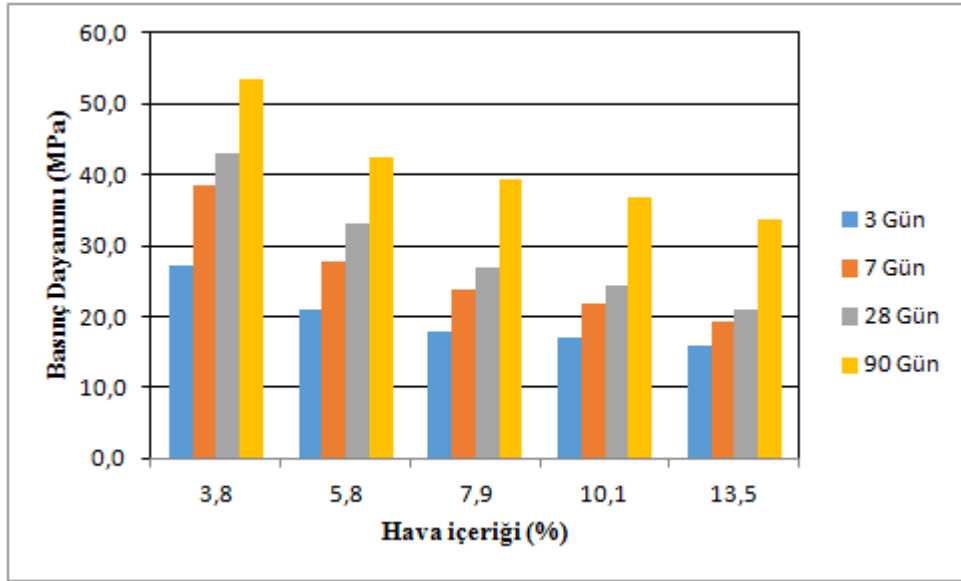
| Karışım | Beton yaşı (Gün) |      |      |      |
|---------|------------------|------|------|------|
|         | 3                | 7    | 28   | 90   |
| K0      | 27.2             | 38.4 | 43.1 | 53.3 |
| K1      | 21.1             | 27.7 | 33.2 | 42.5 |
| K2      | 17.7             | 23.7 | 26.9 | 37.9 |
| K3      | 17.0             | 21.9 | 24.5 | 36.8 |
| K4      | 15.8             | 19.1 | 21.1 | 34.6 |

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.1 incelendiğinde beton basınç dayanımının, tüm karışımlarda, zamana bağlı olarak arttığı görülmektedir. Hava sürükleyici katkılı betonların dayanım değerleri, zamana bağlı olarak daha fazla artış göstermiştir. 3 günden 90 güne çıkıldığında K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin basınç dayanımı sırasıyla %96, %102, 114, %116 ve %119 oranında artmıştır. Buradan da görüleceği gibi sürüklenmiş hava miktarı fazla olan betonların basınç dayanımları zamana bağlı olarak daha fazla artmıştır.



Şekil 4.1. Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç dayanımları

Beton içerisinde bulunan hava boşluğu miktarı sertleşmiş betonun basınç dayanımını etkilemektedir (Kosmatka ve dv., 2002; Erdoğan, 2003; Baradan vd., 2012). Bu çalışmada üretilen taze beton numunelerinin hava içerikleri Bölüm 4.2’de belirtildiği gibi tespit edilmiştir. Şekil 4.2’de hava muhtevasının basınç dayanımına etkisi görülmektedir.



**Şekil 4.2.** Hava muhtevasının beton basınç dayanımına etkisi

Şekil 4.2 incelendiğinde numunelerin içerisinde bulunan hava miktarı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. 90 günlük numunelere bakıldığında, K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 53.3, 42.5, 39.2, 36.8 ve 33.8 MPa'dır. K0'ın basınç dayanımına göre K1, K2, K3 ve K4'ün basınç dayanımındaki azalma sırasıyla %20, %27, %31 ve %37'dir.

Hava sürükleyici katkıların betonun dayanımı üzerinde doğrudan etkisi bulunmaktadır. Hava miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Literatürde her %1'lik hava miktarı artışı için basınç dayanımı yaklaşık %6-10 arasında azaldığı belirtilmektedir (Kosmatka vd., 2002).

#### 4.5 Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımına Etkisi

Çalışma kapsamında üretilen beton numuneler 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra dayanımlarını belirlemek üzere basınç deneyine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler yavaş ve hızlı soğutma olmak üzere iki farklı soğutma işlemine tabi tutulmuş ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Yavaş soğutma işlemi havada, hızlı soğutma işlemi ise suda gerçekleştirilmiştir. Havada soğutulmuş numunelere ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 4.4 ve Şekil 4.3'te, suda soğutulmuş numunelere ait basınç dayanımı değerleri ise Çizelge 4.5 ve Şekil 4.4'te verilmiştir. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler her iki soğutma yönteminde

de tamamen dağılmış ve basınç dayanımı değerleri ölçülmemiştir. Numunelerin basınç dayanım değerlerinin oda sıcaklığında ölçülen basınç dayanım değerlerine göre oranları parantez içinde verilmiştir.

**Çizelge 4.4.** Havada soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

| Karışım | Hava soğutma (MPa) |            |            |            |
|---------|--------------------|------------|------------|------------|
|         | 22 °C              | 250 °C     | 500 °C     | 750 °C     |
| K0      | 43.1               | 41.7 (97%) | 37.9 (88%) | 17.2 (40%) |
| K1      | 41.3               | 36.2 (88%) | 32.2 (78%) | 14.7 (35%) |
| K2      | 38.2               | 32.6 (85%) | 27.2 (71%) | 13.1 (34%) |
| K3      | 35.1               | 32.7 (93%) | 26.0 (74%) | 13.3 (38%) |
| K4      | 32.7               | 30.0 (92%) | 25.2 (77%) | 12.1 (37%) |

**Çizelge 4.5.** Suda soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

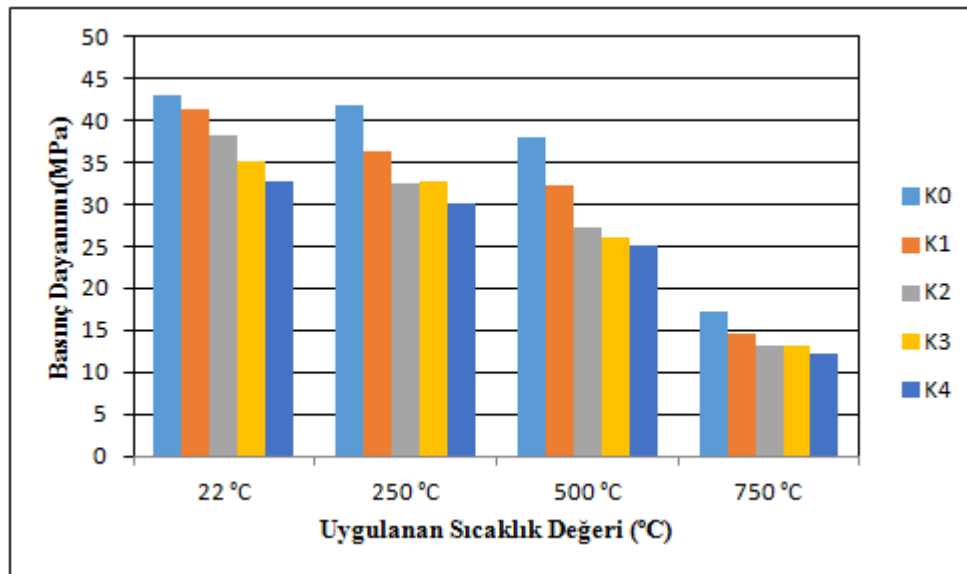
| Karışım | Suda soğutma (MPa) |            |            |            |
|---------|--------------------|------------|------------|------------|
|         | 22 °C              | 250 °C     | 500 °C     | 750 °C     |
| K0      | 43.1               | 40.5 (94%) | 35.5 (82%) | 13.2 (31%) |
| K1      | 41.3               | 37.5 (91%) | 30.6 (74%) | 11.4 (28%) |
| K2      | 38.2               | 33.4 (87%) | 29.3 (77%) | 8.6 (22%)  |
| K3      | 35.1               | 32.8 (93%) | 26.0 (74%) | 9.1 (26%)  |
| K4      | 32.7               | 31.7 (97%) | 22.2 (68%) | 7.8 (24%)  |

Yüksek sıcaklık uygulanmamış numunelerin basınç dayanımları 43.1 MPa ile 30.0 MPa arasında değişmiştir. Bu değerler maruz bırakılan sıcaklığın artması ile düşmeye başlamıştır. Bu durum hem suda hem de havada soğutulan numunelerde görülmüştür. Literatürde, betona uygulanan sıcaklık değerlerinin 750 °C'ye çıkması ile, C-S-H jelinde meydana gelen bozulmalar sebebiyle betonda ciddi dayanım kayıplarının görüldüğü belirtilmiştir (Xu vd., 2001; Khoury vd., 1985; Lin vd., 1996).

Yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin basınç dayanımları uygulanan sıcaklık arttıkça düşmeye başlamıştır. Havada soğutulan numunelerden K0 numunesi 750 °C sıcaklık değerinde 43.1 Mpa basınç dayanımı değerinden %60 dayanım kaybıyla 17.2 MPa değerine düşmüştür. Benzer şekilde diğer tüm karışımlarda sıcaklığın artması ile basınç dayanımında düşüş görülmüştür. K1 numunesinde %65, K2 numunesinde %66, K3

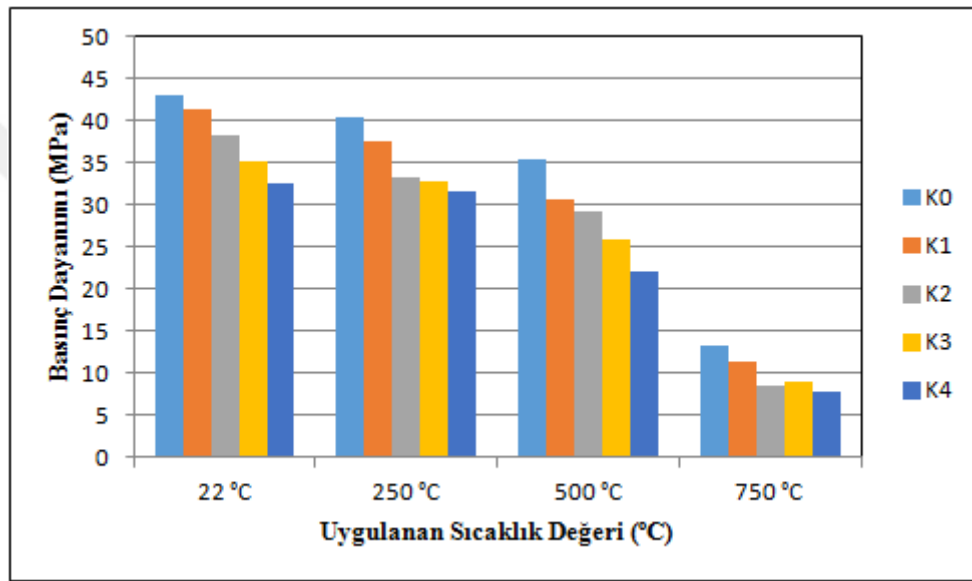
numunesinde %62 ve K4 numunesinde %63 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır. 250 °C sıcaklık değerinde K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde yaşanan dayanım kaybı sırasıyla %3, %12, %15, %7 ve %8 oranlarında ve 500 °C sıcaklık değerinde ise K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde yaşanan dayanım kaybı sırasıyla %12, %22, %29, %26 ve %23 oranlarındadır. Tüm sıcaklıklarda K0 karışımı yüksek sıcaklığa en iyi direnci göstermiştir. 250 °C sıcaklık değerinde K3 ve K4 karışımı, K1 ve K2 karışımına göre daha iyi direnç göstermiştir. 500 °C sıcaklık değerinde de K3 ve K4 karışımının dayanım kaybı düşmüştür.

Suda soğutulan numunelerden K0 numunesi 750 °C sıcaklık değerinde 43.1 Mpa basınç dayanımı değerinden %69 dayanım kaybıyla 13.2 MPa değerine düşmüştür. Benzer şekilde suda soğutulan diğer tüm karışımlarda da sıcaklığın artması ile basınç dayanımında düşüş görülmüştür. K1 numunesinde %72, K2 numunesinde %78, K3 numunesinde %74 ve K4 numunesinde %76 oranında dayanım kaybı yaşanmıştır. 250 °C sıcaklık değerinde K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde yaşanan dayanım kaybı sırasıyla %6, %9, %13, %7 ve %3 oranlarında ve 500 °C sıcaklık değerinde ise K0, K1, K2, K3 ve K4 numunelerinde yaşanan dayanım kaybı sırasıyla %18, %26, %23, %26 ve %32 oranlarındadır. 250 °C sıcaklık değerinde K4 karışımı, diğer karışımlara göre yüksek sıcaklığa daha iyi direnç göstermiştir. 500 °C ve 750 °C ise yüksek sıcaklığa en iyi direnci K0 karışımı göstermiştir.



**Şekil 4.3.** Havada soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Deneysel çalışma sonrasında, soğutma yönteminin etkili olduğu görülmüştür. Hem yavaş hem de hızlı soğutma yöntemi uygulanan deney numunelerinin basınç dayanımlarında düşme gözlenmiştir. Ancak, hızlı soğutulan numunelerde özellikle yüksek sıcaklıklarda bu düşüş daha belirgindir. 250 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde, soğutma yönteminin etkisi pek belirgin değildir. Havada soğutulan numunelerin basınç dayanımı kaybı %3 ile %15 arasında değişirken, suda soğutulan numunelerin basınç dayanımı kaybı %3 ile %13 arasında değişmektedir. Ancak, uygulanan sıcaklık 500 °C ve 750°C sıcaklığa yükseltildiğinde numunelerin dayanım kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.



**Şekil 4.4.** Suda soğutulmuş numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Çalışmada suda soğutulan numunelerin havada soğutulan numunelere göre daha fazla dayanım kaybına uğradığı görülmüştür. Bunun sebebi ise literatürde şu şekilde açıklanmaktadır. Beton numunesi 400-500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldığında serbest  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{CaO}$ 'e dönüşür.  $\text{CaO}$  su ile karşılaştığında tekrar  $\text{Ca(OH)}_2$  oluşur ve bu durum hacimde genleşmeye sebep olur (Aydın, 2008; Sarshar ve Khoury, 1993). Suda hızlı soğutma daha yoğun boşluklu bir yapıya sebep olur. Bu durum bileşenlerin yüksek sıcaklıklarda bozunmasının sonucu olabilir (Khoury, 1992). Ayrıca, hızlı soğutma yönteminde numunenin iç sıcaklığının değişmesinden dolayı çatlaklar oluşmakta ve bu durum dayanım değerlerinde düşmeye sebep olmaktadır (Bilim, 2011).

#### 4.6 Yüksek Sıcaklığın Ultrases Geçiş Hızına Etkisi

Bir malzemenin ultrases geçiş hızı o malzemenin boşluk yapısına, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır (Akçaözoğlu vd., 2013). Betonun kompasitesi ve yoğunluğu azaldıkça ultrases geçiş hızı değeri de azalmaktadır (Whitehurst, 1951; Zoldners, 1971).

Tez çalışmasında üretilen ve yüksek sıcaklık uygulanmış numunelerin ultrases geçiş hızları ölçülmüştür. Havada ve suda soğutulan numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7’de sunulmuştur.

**Çizelge 4.6.** Havada soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn)

| Karışım | Havada soğutma(km/sn) |        |        |        |
|---------|-----------------------|--------|--------|--------|
|         | 22 °C                 | 250 °C | 500 °C | 750 °C |
| K0      | 4.78                  | 4.49   | 3.61   | 2.51   |
| K1      | 4.60                  | 4.35   | 3.51   | 2.33   |
| K2      | 4.55                  | 4.26   | 3.09   | 2.20   |
| K3      | 4.44                  | 4.16   | 3.01   | 2.11   |
| K4      | 4.31                  | 4.01   | 2.90   | 1.97   |

**Çizelge 4.7.** Suda soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn)

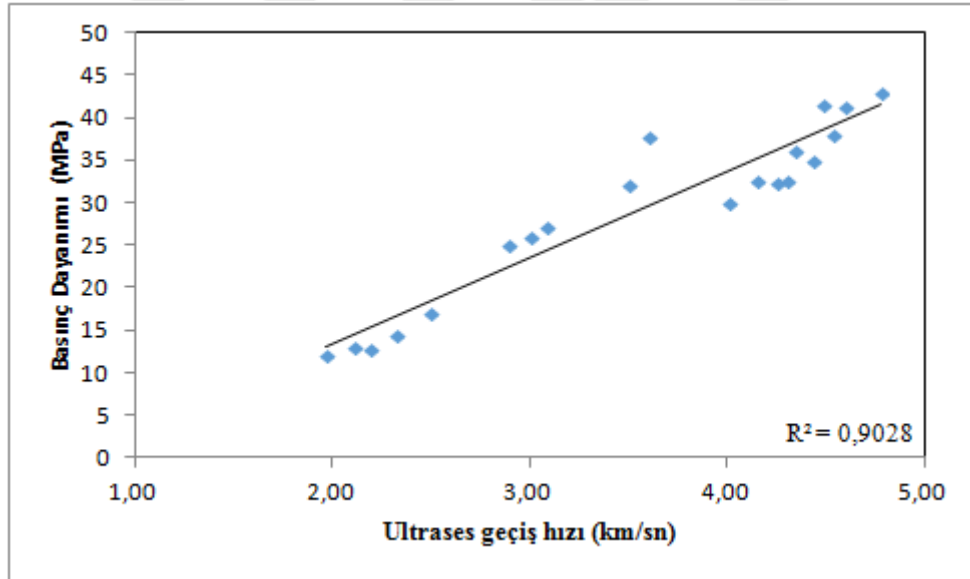
| Karışım | Suda soğutma(km/sn) |        |        |        |
|---------|---------------------|--------|--------|--------|
|         | 22 °C               | 250 °C | 500 °C | 750 °C |
| K0      | 4.78                | 4.53   | 3.34   | 1.21   |
| K1      | 4.60                | 4.22   | 3.12   | 1.14   |
| K2      | 4.55                | 4.07   | 2.96   | 1.08   |
| K3      | 4.44                | 3.99   | 2.87   | 0.96   |
| K4      | 4.31                | 3.70   | 2.74   | 0.90   |

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 incelendiğinde, numunelere uygulanan sıcaklığın artmasıyla birlikte ultrases geçiş hızlarının da düştüğü görülmektedir. Soğutma yöntemi basınç dayanımında olduğu gibi ultrases geçiş hızlarını da etkilemiştir. Suda soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarının, havada soğutulan numunelerin ultrases geçiş

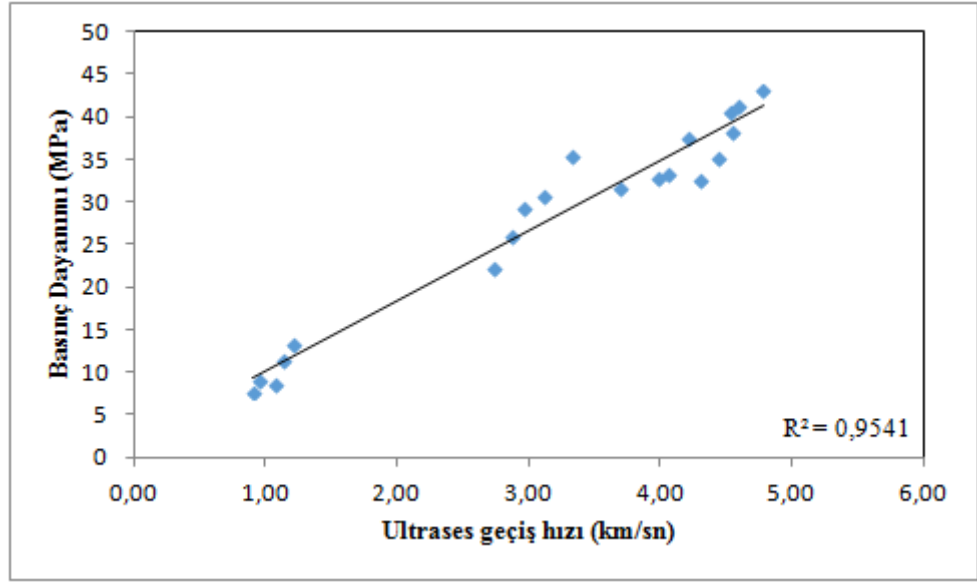
hızlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum suda soğutmanın numunelere daha fazla zarar verdiğini göstermektedir.

Yüksek sıcaklık etkisi numuneleri olumsuz etkilemiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri artan sıcaklığa bağlı olarak düşmüştür. Artan yüksek sıcaklık numunelerin boşluk yapısında artışa neden olmuş ve yapısından suyun buharlaşması nedeniyle numunelerin ağırlıklarında azalmalar ve ilave boşluklu yapılar meydana getirmiştir. Bu durum ultrases geçiş hızlarında da düşmeye neden olmuştur (Demirel ve Keleştemur, 2010; Topçu ve Demir, 2007).

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin ölçülen basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki havada soğutulan numuneler için Şekil 4.5'te, suda soğutulan numuneler için ise Şekil 4.6'da verilmiştir. Havada soğutulan numunelerde basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasında korelasyon katsayısı 0,90 olan, suda soğutulan numunelerde ise korelasyon katsayısı 0,95 olan bir ilişki elde edilmiştir.



Şekil 4.5. Havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki



**Şekil 4.6.** Suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki

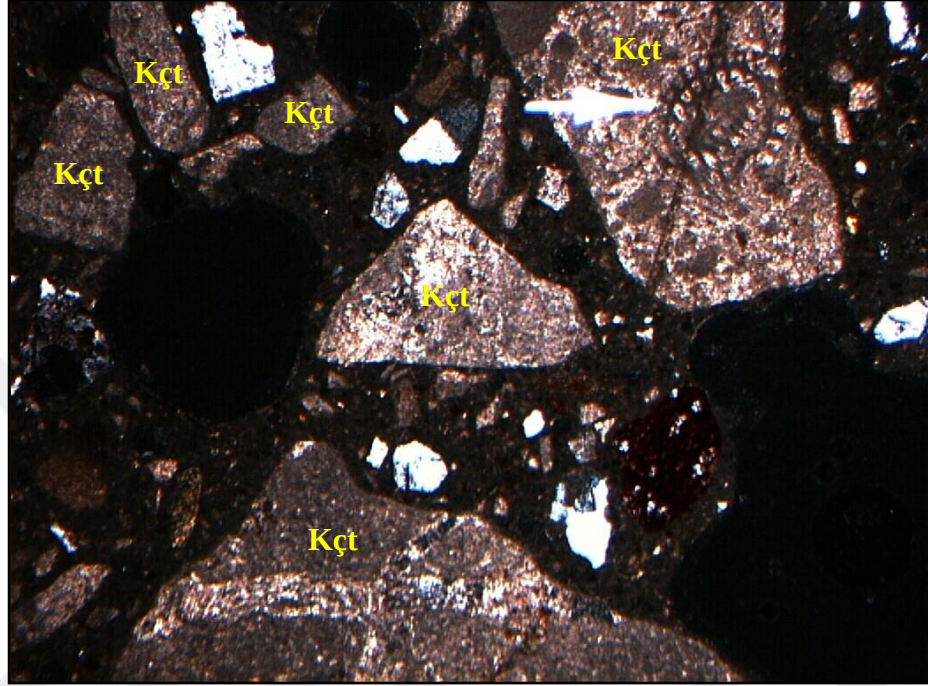
#### 4.7 Mineral ve Doku Değışimlerinin Mikroskobik Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda (%0, %0.025, %0.050, %0.075 ve %0.1) hava sürükleyici katkı içeren beton numuneleri 250, 500, 750 ve 1000 °C ısıya maruz bırakılıp havada ve suda soğutulmuştur. Ancak hava içeriğİ ve soğutma yöntemine bağlı dokusal değışimler literatürde belirtilen dokusal değışimlerin keskin olarak gözlemlenmeye başlandığı 500 °C ısıya maruz bırakılan, hem havada hem de suda soğutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Akçaözoğlu, 2013; Georgali, 2005). Değerlendirmelerde, doku karşılaştırmaları yapılırken detayları Bölüm III'te verilen bölgelere dikkat edilmiştir.

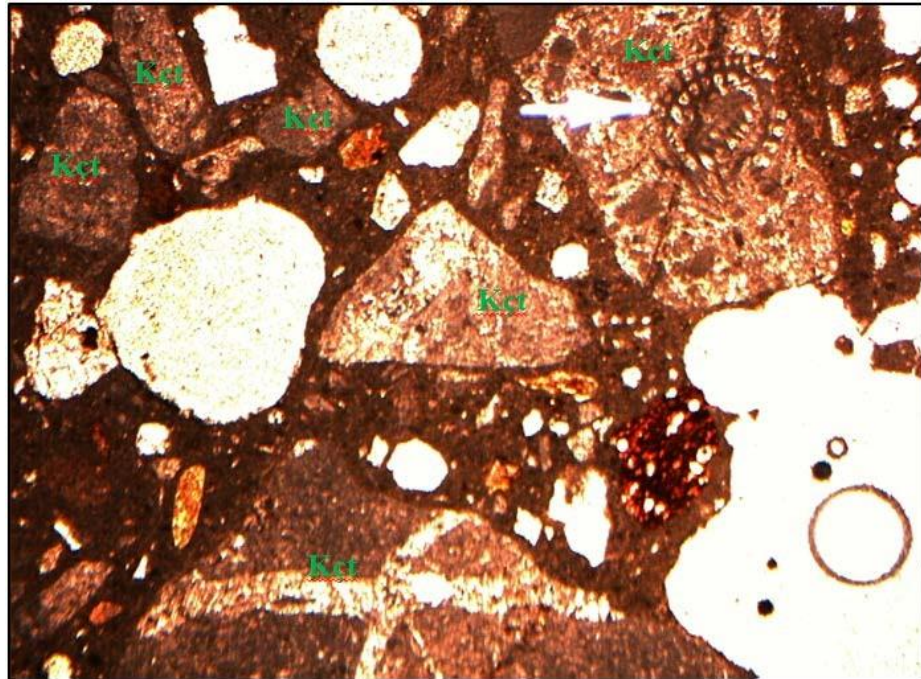
##### 4.7.1 Mineraljik ve petroğrafik bulgular

Beton numunesi mineralojik ve petroğrafik olarak değerlendirildiğinde; ana agreganın mikro kristalize kalsit olduğu (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8), beton matriksinin kum ve silt boyutunda ince agrega içerdİği (Şekil 4.9 ve Şekil 4.10), ayrıca az miktarda bazalt parçacıklarının olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.9'daki agrega geometrilerine bakıldığında çoğunluğunun köşeli olduğu, dolayısıyla konkasörde kırılma sonucu elde edildiği anlaşılmaktadır. Betonun ana agregası olan mikrokristalize kireçtaşı fosil kalıntıları içermektedir (Şekil 4.7). Betonu oluşturan matriks ile agregalar arasında sıkı

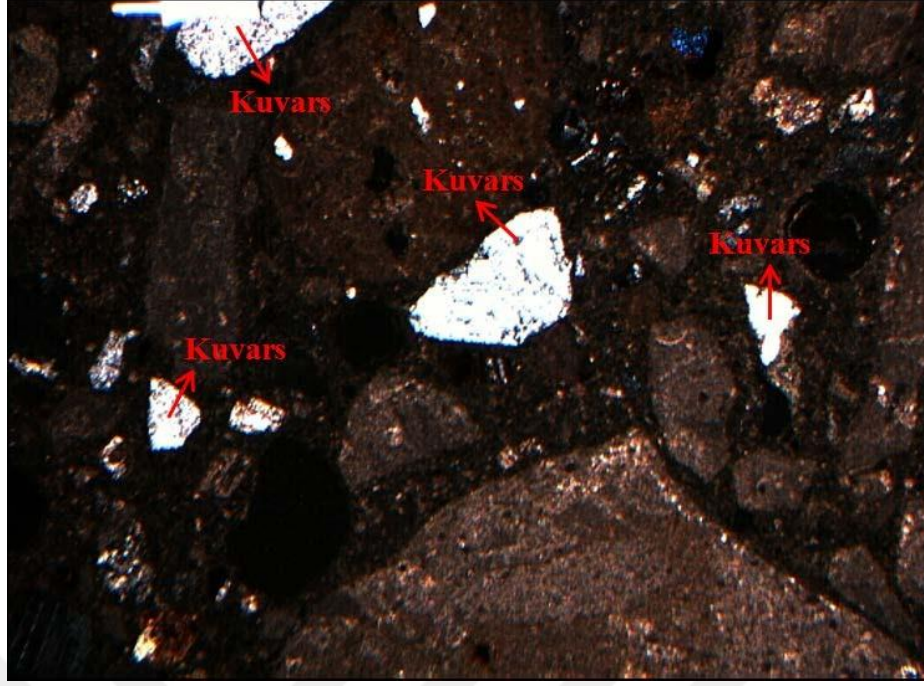
bir aderansın olduğu, matriksin taneleri iyice çevrelediği, agregaların kenar kısımlarında herhangi bir boşluk olmadığı da gözlenmiştir. Hemen hemen tüm numunelerde gözlenen bu dokusal durum benzerliğinden, numunelerin oluşturma koşullarının aynı olduğu da anlaşılmaktadır.



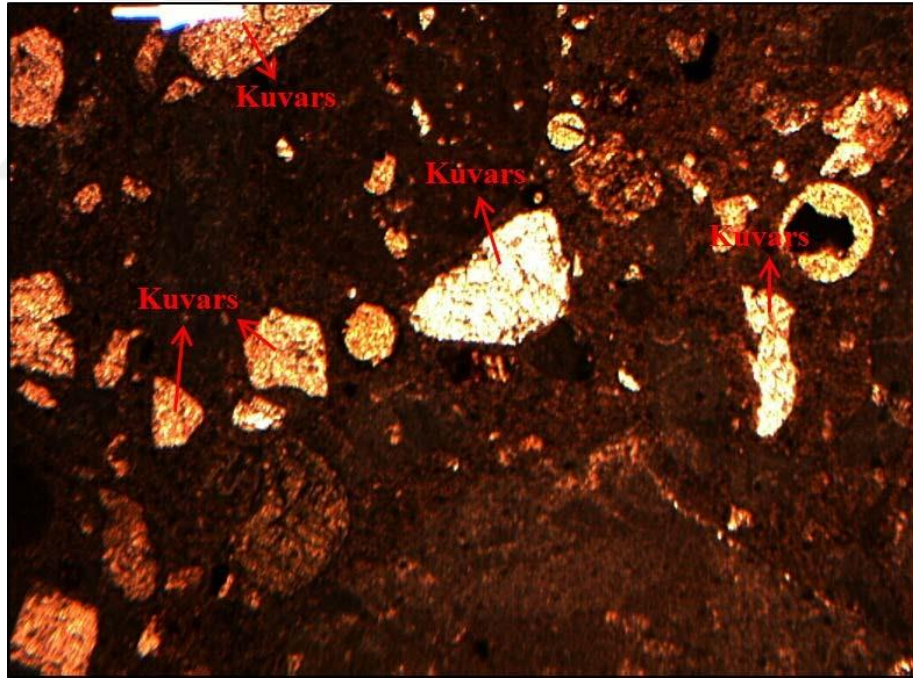
Şekil 4.7. Betonda gözlenen az fosilli mikrokristalize kireçtaşı (ÇN)



Şekil 4.8. Betonda gözlenen az fosilli mikrokristalize kireçtaşı (TN)



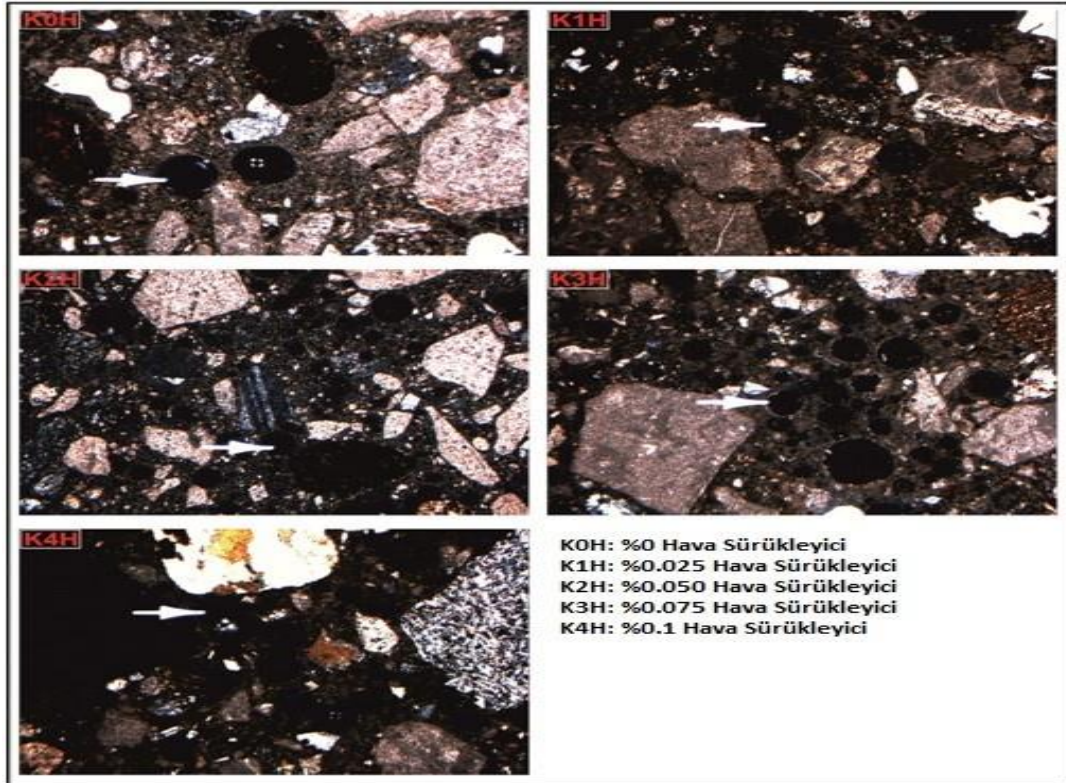
Şekil 4.9. Beton matriksinde gözlenen kum ve silt boyutundaki kuvars kristalleri (ÇN)



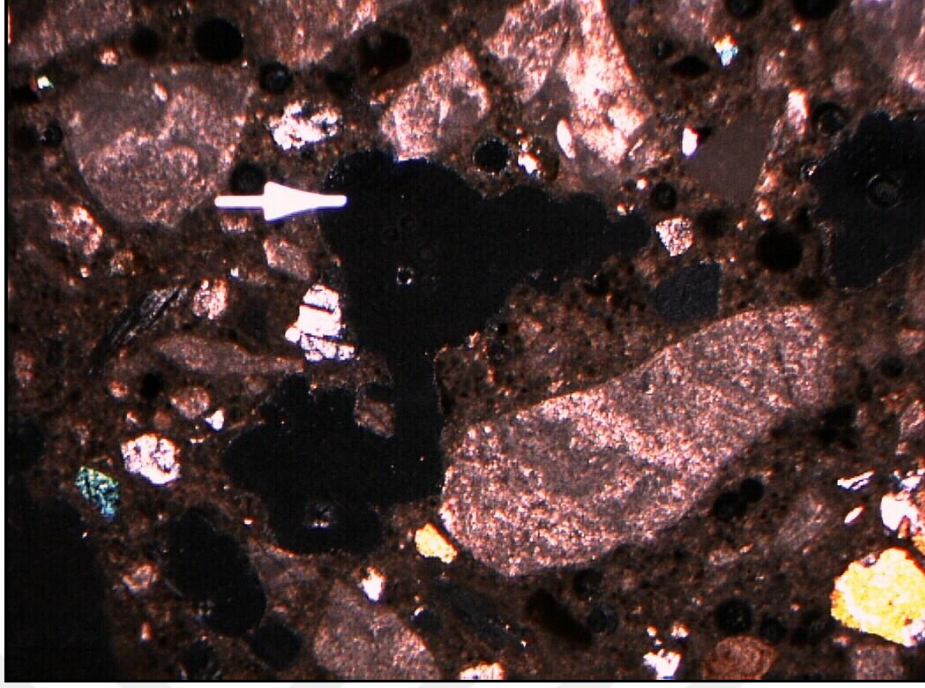
Şekil 4.10. Beton matriksinde gözlenen kum ve silt boyutundaki kuvars kristalleri (TN)

#### 4.7.2 Hava sürükleyicilerin neden olduğu boşluk dağılımı

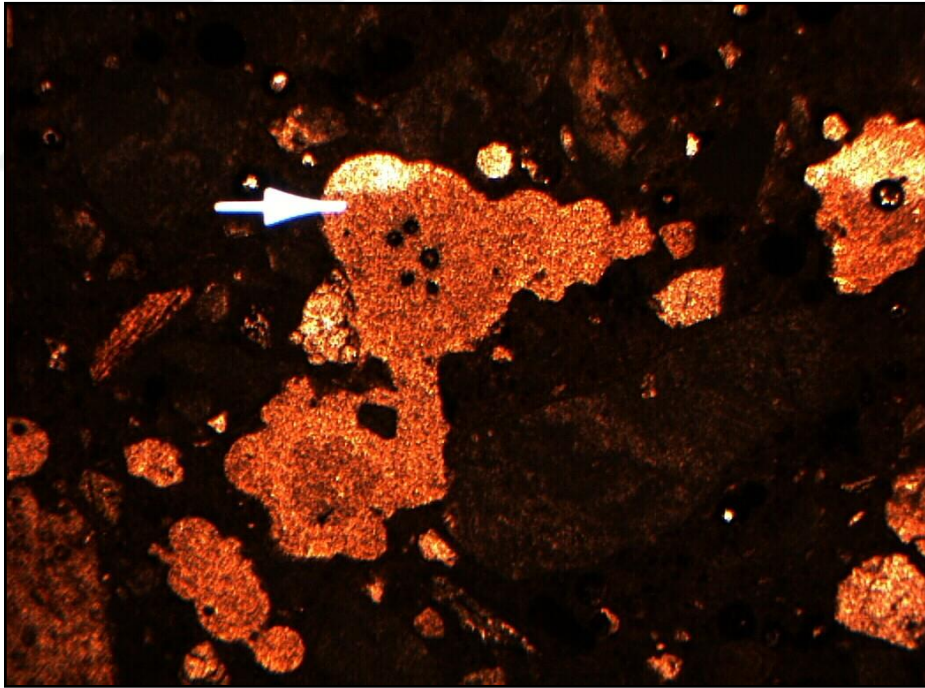
Farklı oranlarda hava sürükleyici katkı içeren numunelerin kesit görüntülerinde katkı oranına bağlı olarak boşluk miktarının değıştiğı, katkı oranı arttıkça boşluk miktarının da arttığı gözlenmiştir (Şekil 4.11). Hava sürükleyicisinin neden olduğu boşlukların dıştan içe doğru bağımsız olarak homojen bir şekilde dağılmış olduğu ancak % 0.50 ve daha fazla hava sürükleyici içeren numunelerde hava boşluklarının bazı yerlerde tekil değil teğet yada birbirini kesecek şekilde kısmi olarak iç içe girmiş olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13). Ayrıca bu etkileşim sonucu hava kabarcıklarının kesit içerisinde kapladığı alanların arttığı da anlaşılmaktadır (Şekil 4.13).



Şekil 4.11. Hava sürükleyici katkının neden olduğu boşluk dağılımı ve geometrisi (TN)



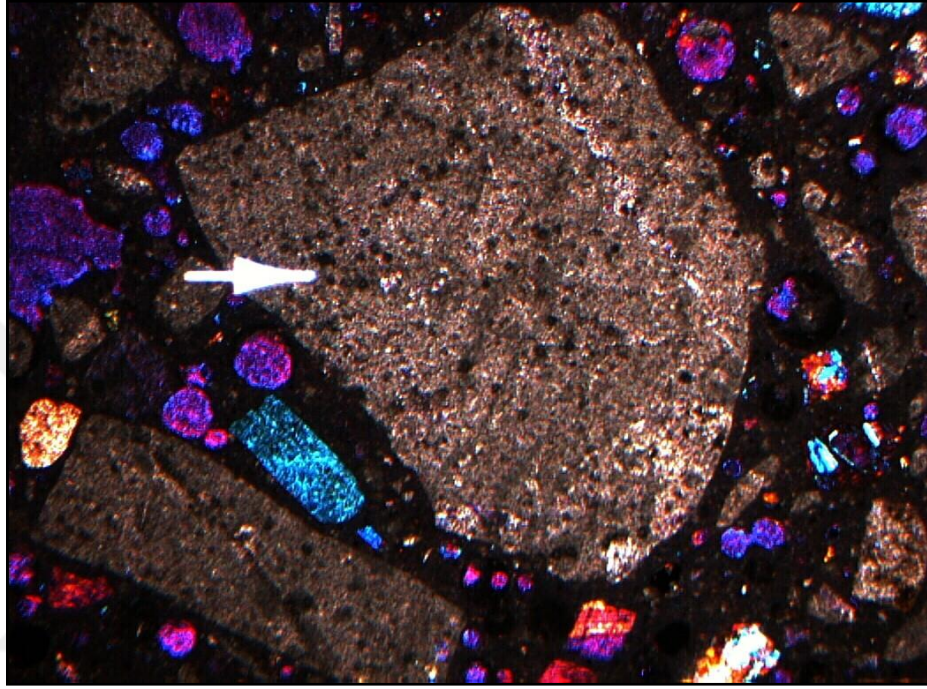
Şekil 4.12. Beton matriksinde gözlenen iç içe geçmiş boşluk görüntüleri (ÇN)



Şekil 4.13. Beton matriksinde gözlenen iç içe geçmiş boşluk görüntüleri (ÇN)

% 0.050 hava sürükleyici içeren kesitlerde gözlenen boşlukların teğet duruşları ve kısmi iç içe geçme durumları Şekil 4.11’de, % 0.075 ve % 0.1 hava sürükleyici içeren kesitlerde gözlenen hava boşluklarının konumları ise Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te sunulmuştur. Ayrıca boşluk geometrileri ve büyüklükleri incelendiğinde % 0.050’den

fazla hava sürükleyici içeren kesitlerde gözlenen boşlukların azda olsa daha iri boyutta olduğu gözlenmiştir. Ayrıca boşlukların daha çok matriks içerisinde dağıldığı, agrega çevresinde ve kenar kısımlarda kümeleme yapmadığı görülmüştür. Şekil 4.14'te boşlukları opak ilminatörle renklendirilen, kuvars kristali çevresindeki matriks içerisinde homojen dağılım gösteren boşluklar net olarak görülmektedir.



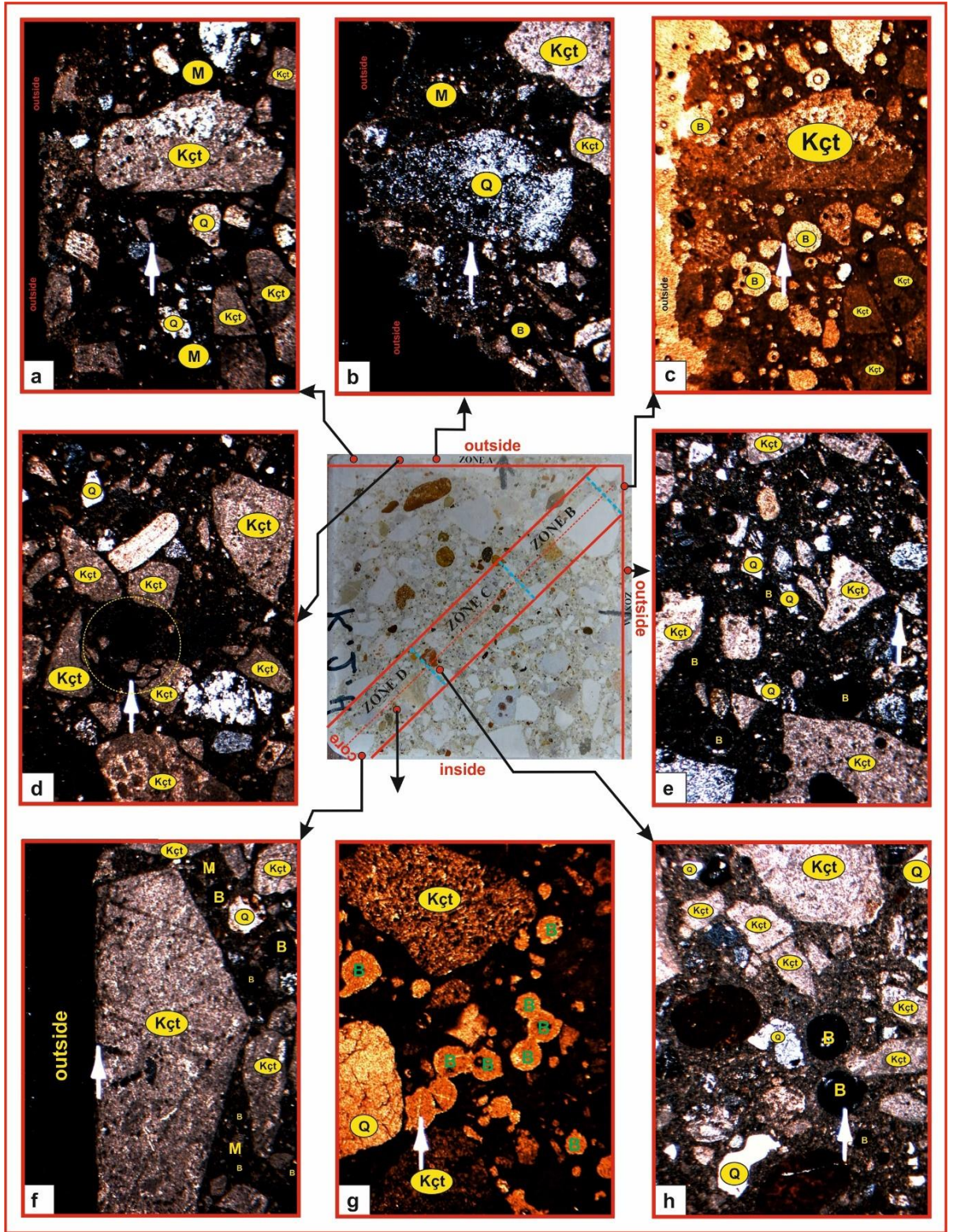
**Şekil 4.14.** Kuvarsı saran matriks içerisinde gözlenen boşlukların görüntüsü (ÇN)

Farklı oranlarda hava sürükleyici içeren numunelerin boşluk geometrileri ve konumlarına bakıldığında; boşlukların hemen hemen tüm numunelerde iç içe geçmiş olsa dahi bağımsız olduğu, herhangi bir kılcal kanal ile birleşmedikleri gözlenmiştir. İstisnai bazı boşluklar hariç tüm boşlukların tam dairesel yada tam dairesele yakın geometride oldukları görülmüştür (Şekil 4.11).

#### **4.7.3 Dokusal değişim**

Farklı oranlarda hava sürükleyici (% 0, % 0.025, % 0.050, % 0.075, %0,1) içeren ve 500 °C ısıya maruz bırakılıp daha sonra havada ve suda soğutulan tüm numunelerde dış yüzeyden iç merkeze doğru belirgin bir doku farklılaşması gözlenmemiştir. Dokusal farklılıklar sadece suyla soğutulan numunelerin soğutma esnasında suyla temas eden dış bölgelerinde yaklaşık 1-5 mm'lik kısımlarında (A bölgesi) ve doğal yada hava

sürükleyicilerin neden olduğu boşlukların kenar kısımlarında bozuşmalar şeklinde gözlenmiştir.



Şekil 4.15. Dıştan içe doğru numunelerde gözlenen doku değişimleri

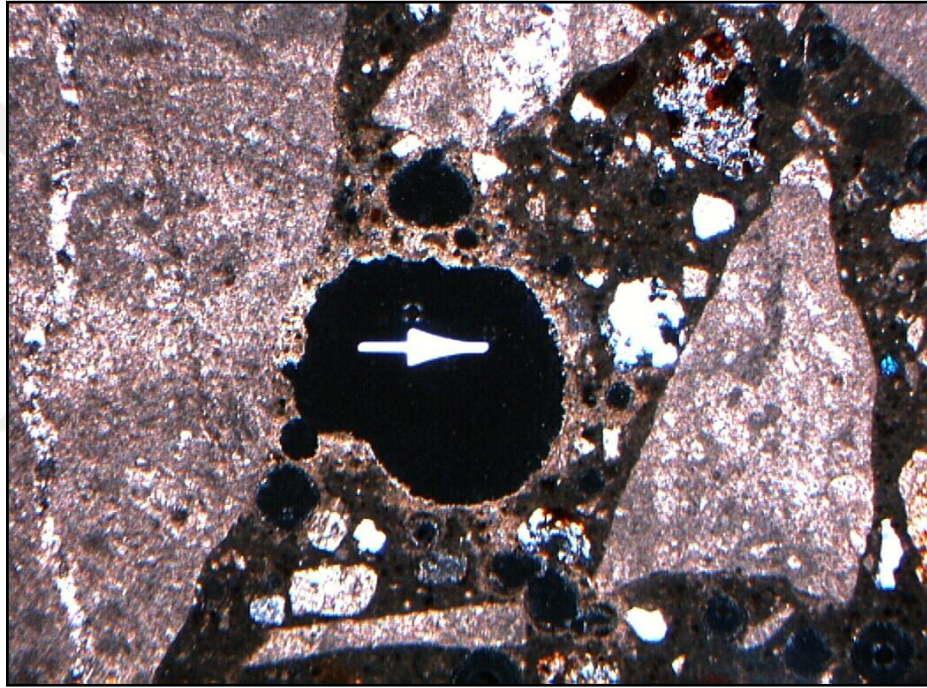
Numunelerin dıştan içe doğru dokusal farklılaşmaları tüm kesitlerin dış bölgelerinin bazı kısımlarında belirgin olarak bazı kısımlarında ise kısmen gözlenebilmiştir. A bölgesi olarak belirlenen kenar bölgelerinde özellikle matriksin ufalandığı elek dokusu şeklinde kırıklı ve parçalı bir doku kazandığı görülmüştür, tanımlanan bu doku türü havada soğutulan numunelerde az olmakla birlikte suda soğutulan tüm numunelerde belirgin olarak gözlenmiştir (Şekil 4.15 a). Bu bölgede bulunan agregalar arası farklılaşma değerlendirildiğinde kuvars kumlarındaki kırılma ve parçalanmalar mikro kristalize kireçtaşı agregasına göre daha fazla ve belirgindir (Şekil 4.15 b, c). Kireçtaşı agregaları kuvars agregasına oranla ısı ve suyla soğutmadan daha az etkilenmiştir.

İnce kesitlerde bozuşmanın yoğun olduğu bölgeler incelendiğinde farklılaşmanın daha çok boşluk çeperlerine yakın yerlerde yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.15'te daire içerisine alınan bölgeye bakıldığında ana bozuşmanın hava sürükleyicinin neden olduğu boşluğun etrafında yoğunlaştığı, matriks ve betonun ana agregası olan kristalize kireçtaşının kenar kısımlarında parçalanmalar olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı şekilde kuvars kristalinde meydana gelen kırılmalar ve kısmi parçalanmalar da net olarak gözlenmektedir (Şekil 4.15 d). Aynı kesitin diğer dış kenarına bakıldığında benzer elek dokusunun hakim olduğu matriks ve agregalarda kısmi kırılma ve parçalanmaların olduğu görülmektedir (Şekil 4.15 e).

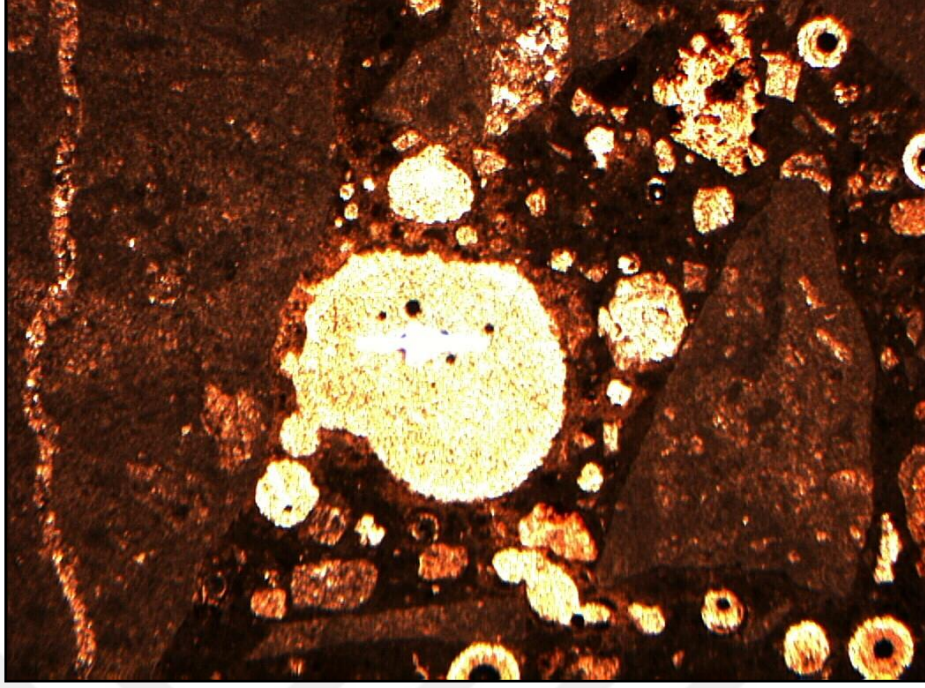
Aynı kesitte yaklaşık 5 mm'lik dış bölgeden iç bölgeye doğru ilerledikçe hakim elek dokusu kaybolmakta matriks ve ana agregalarda gözlenen kırılma ve ufalanmalar bu bölgede gözlenmemektedir (Şekil 4.15 f, h), ayrıca numunenin iç kenar çizgisinin doğrusal olduğu, herhangi bir kırılma yada ufalanmanın olmadığı anlaşılmaktadır (Şekil 4.15 f). Gözlenen bu doku farklılaşmasından 500 °C ısıya maruz kalan numunelerde etki derinliğinin çok fazla olmadığı 1-5 mm arasında sınırlı kaldığı, bu derinlikten sonra iç kısım dokularının şahit numunelerin dokusuna benzer bir yapı sunduğu görülmüştür.

Su ile soğutulan kesitlerin neredeyse tamamında özellikle beton numunelerinin dış bölgelerindeki (A bölgesi) boşluk iç çeperlerinin kesitin diğer kısımlarına nazaran daha fazla bozuştığı ince kesitlerde net olarak görülmektedir (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). Boşluk iç çeperi bozuşması numunelerin iç kısımlarına doğru gidildikçe azalmakta ve belli bir bölgeden sonra neredeyse hiç gözlenmemektedir. Boşluk iç çeper bozuşmalarına ani temas eden soğutma suyunun neden olduğu, soğutma suyunun belli

bir derinlikten sonra etkisinin azaldığı ve iç kısımlarda etkisini tamamen kaybettiği düşünülmektedir. Hava sürükleyici boşlukların iç çeper bozuşması sadece iç zon bozulması şeklinde kalmayıp başlangıçta % 95 oranında dairesel olan boşlukların geometrilerini de değiştirmekte, dairesellikten uzaklaştırmaktadır. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de boşluk çeperinde gözlenen bozuşmanın neden olduğu ton farkı ve dairesellikten uzaklaşan boşluk geometrileri net olarak görülmektedir. Kesitlerde gözlenen iç çeper bozuşmaları iri boşluklarda daha baskın ve belirgin, küçük boşluklarda ise daha sınırlı düzeydedir.



**Şekil 4.16.** Boşluk iç çeperlerinde gözlenen bozuşma (Ç.N)



Şekil 4.17. Boşluk iç çeperlerinde gözlenen bozuşma (Ç.N)

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

Çalışma kapsamında üretilen taze beton numunelerinin birim hacim ağırlıkları 2265 ile 2030 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiştir. Taze betonun içerisindeki hava miktarı arttıkça betonun birim hacim ağırlığının düştüğü görülmüştür.

Üretilen taze betonun yayılma değerleri 45 ile 49 cm arasında değişmiştir. Sürüklenmiş hava miktarının betonun yayılma değerine fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Hava sürükleyici katkı miktarı arttıkça sürüklenmiş hava miktarında doğrusal bir artış görülmüştür.

Hava sürükleyici katkılı betonların dayanım değerleri, zamana bağlı olarak daha fazla artış göstermiştir. 3 günden 90 güne çıkıldığında K0 numunesinin basınç dayanımı değeri %96 artış gösterirken, K4 numunesinin basınç dayanımı değeri %119 oranında artmıştır.

Numunelerin içerisinde bulunan hava miktarı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. 90 günlük numunelerin basınç dayanımına bakıldığında, K4 numunesinin basınç dayanımı, K0 numunesinin basınç dayanımına göre %37 azalmıştır.

Numunelere yüksek sıcaklık uygulanmasıyla birlikte basınç dayanımlarında düşüşler başlamıştır. Numunelerin basınç dayanımları, maruz bırakılan sıcaklığın artması ile daha çok azalmıştır. Bu durum hem suda hem de havada soğutulan numunelerde görülmüştür.

Deneyisel çalışma sonrasında, soğutma yönteminin basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Hem yavaş hem de hızlı soğutma yöntemi uygulanan deney numunelerinin basınç dayanımlarında düşme gözlenmiştir. Ancak, hızlı soğutulan numunelerde özellikle yüksek sıcaklıklarda bu düşüş daha belirgin olmuştur.

Numunelere uygulanan sıcaklığın artmasıyla birlikte ultrases geçiş hızlarının da azaldığı görülmüştür. Soğutma yöntemi basınç dayanımında olduğu gibi ultrases geçiş hızlarını da etkilemiştir. Suda soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarının, havada soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarından daha düşük olduğu görülmüştür.

Farklı oranlarda hava sürükleyici içeren numunelerin kesit görüntülerinde katkı oranı arttıkça boşluk miktarının da arttığı gözlenmiştir. Hava sürükleyicisinin neden olduğu boşlukların dıştan içe doğru bağımsız olarak homojen bir şekilde dağılmış olduğu ancak % 0.50 ve daha fazla hava sürükleyici içeren numunelerde hava boşluklarının bazı yerlerde birbirini kesecek şekilde iç içe girmiş olduğu gözlenmiştir.

Farklı oranlarda hava sürükleyici içeren numunelerin boşluk geometrileri ve konumlarına bakıldığında; boşlukların hemen hemen tüm numunelerde bağımsız olduğu, herhangi bir kılcal kanal ile birleşmedikleri gözlenmiştir. İstisnai bazı boşluklar hariç tüm boşlukların tam dairesel yada tam dairesele yakın geometride oldukları görülmüştür.

Farklı oranlarda hava sürükleyici içeren ve 500 °C ısıya maruz bırakılıp daha sonra havada ve suda soğutulan tüm numunelerde dış yüzeyden iç merkeze doğru belirgin bir doku farklılaşması gözlenmemiştir. Dokusal farklılıklar sadece suyla soğutulan numunelerin soğutma esnasında suyla temas eden dış bölgelerinde yaklaşık 1-5 mm'lik kısımlarında ve doğal yada hava sürükleyicilerin neden olduğu boşlukların kenar kısımlarında bozuşmalar şeklinde gözlenmiştir.

Agregalar arasındaki dokusal farklılaşma değerlendirildiğinde kuvars kumlarındaki kırılma ve parçalanmaların mikro kristalize kireçtaşı agregasına göre daha fazla ve belirgin olduğu görülmüştür. Kireçtaşı agregaları kuvars agregasına oranla yüksek sıcaklıktan ve suyla soğutmadan daha az etkilenmiştir.

Su ile soğutulan kesitlerin neredeyse tamamında özellikle beton numunelerinin dış bölgelerindeki boşluk iç çeperlerinin kesitin diğer kısımlarına nazaran daha fazla bozuştuğu görülmüştür. Boşluk iç çeperi bozuşması numunelerin iç kısımlarına doğru gidildikçe azalmış ve belli bir bölgeden sonra neredeyse hiç gözlenmemiştir.



## KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, K., “Microstructural examination of concrete exposed to elevated temperature by using plane polarized transmitted light method”, **Construction and Building Materials** 48, 772–779, 2013.

Akçaözoğlu, S., Akçaözoğlu, K. and Atış, C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, **Composites Part B** 45(1), 721-726, 2013.

Aitcin, P.C., Ballivy, G., Mitchell, D., Pigeon, M. and Coulombe, L.G., The use of a high-performance air-entrained concrete for the construction of the Portneuf Bridge. In P. Zia (Ed.), **High Performance Concrete in Severe Environments, ACI Special Publication**, Detroit, USA, 1993.

Akman, M. S., “Yapı hasarları ve onarım ilkeleri”, **Livane Matbaacılık**, İstanbul, 2000.

Aköz, F. ve Yüzer, N., “Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri”, **Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi** 3, 89-98, 1994.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., “Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri”, **TMMOB Teknik Dergi** 6 (1), 919-931, 1995.

Alonso, C., Andrade, C. and Khoury, G.A., Porosity & microcracking, **International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete**, Udine, Italy, 2003.

Anderberg Y., Thermal properties and analysis, **International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete**, Udine, Italy, 2003.

Andrade, C., Alonso, C. and Khoury, G.A., Microstructure & moisture, **International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete**, Udine, Italy, 2003.

ASTM C 597-09, Standard test method for pulse velocity through concrete, **American Society For Testing And Materials**, USA, 2009.

Avcı, A.U., Dökümde enerji tasarrufu, **Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları**, İstanbul, 1984.

Aydın, S. ve Baradan, B., “Yüksek sıcaklığa dayanıklı harç geliştirilmesi”, **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, s. 451-460, 1-3 Ekim, 2003.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., Beton, **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, İzmir, 2012.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., “Betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite)”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları**, İzmir, 2002.

Camposagrado, G.R., An investigation on the cause and effect of air-void coalescence in air-entrained concrete mixes, **Portland Cement Association**, U.S., 2006.

Chan, Y.N.S., Peng, G.F. and Anson, M., “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperature”, **Cement and Concrete Composites** 21, 23-27, 1999.

Chatterji, S., “Freezing of air-entrained cement-based materials and specific actions of air-entraining agents”, **Cement and Concrete Composites** 25 (7), 759–765, 2003.

Cioni P., Croce P. and Salvatore W., “Assessing Fire Damage to R.C. Elements”, **Fire Safety Journal** 36, 181-199, 2001.

Cülfik, M.S., Deterioration of bond between cement paste and aggregate at high temperatures, Doktora Tezi, **Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 25-27, 2001.

Demir, A., Kiremit kırığı agregalı betonlarda yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi, Doktora Tezi, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, s. 15-16, 2008.

Demirel, B. and Keleştemur, O., “Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume”, **Fire Safety Journal** 45, 385-391, 2010.

Dias, W.P.S., Khoury, G.A. and Sullivan, P.J.E., “Mechanical properties of hardened cement paste exposed to temperatures up to 700 °C (1292 F)”, **ACI Materials Journal**, 8, 160-166, 1990.

Dodson, V., Concrete admixtures, **Van Nostrand Reinhold**, New York, 1990.

Erdoğan, T.Y., Karışım ve bakım suları, **Türkiye Hazır Beton Birliği**, İstanbul, 1995.

Erdoğan, T.Y., Beton, **ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını**, Ankara, 2003.

Feldman, R.F. and Ramachandran, V.S., “Differentiation of interlayer and adsorbed water in hydrated Portland cement ion thermal analysis”, **Cement and Concrete Research** 1, 607-611, 1971.

Felicetti, R. and Gambarova, P.G., “Effect of high temperature on residual compressive strength of high strength siliceous concretes”, **ACI Materials Journal** 95, 395-406, 1998.

Friberg, S., Emulsion stability, In: Friberg S (Ed.), **Food emulsions**, New York, 1976.

Gebler, S.H. and Klieger, P., Effect of fly ash on the air-void stability of concrete, **Portland Cement Association**, U.S., 1983.

Georgali, B. and Tsakiridis, P.E., “Microstructure of fire-damaged concrete. a case study.”, **Cement and Concrete Composites** 27, 255-259, 2005.

Haddad, R.H. and Shannis, L., “Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel”, **Construction and Building Materials** 18, 425-435, 2004.

Haksever A., “Yangın odalarının teorik-nümerik yangın analizleri için modelleştirilmesi, **Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi** 6, 57- 66, 1991.

Khoury, G.A., “Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment”, **Magazine of Concrete Research** 44, 291-309, 1992.

Khoury, G.A., Grainger, B.N. and Sullivan, P.J.E., “Transient thermal strain of concrete: Literature review, conditions within specimen and behavior of individual constituents”, **Magazine Concrete Research** 37 (132), 131-144, 1985.

Khoury, G.A. and Sarshar, R., “Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures”, **Magazine Concrete Research** 45(162), 51-61, 1993.

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B. and Panarese, W. C., Design and control of concrete mixtures 14th ed., **Portland Cement Association**, U.S.A, 2002.

- Lankard, D.R. and Birkimer, D.L., "Effect of moisture content on the structural properties of Portland cement concrete exposed to temperatures up to 500 F", **ACI Temperature and Concrete SP-25**, 59-102, 1971.
- Lea, F.C. and Stradling, R., "The resistance to fire of concrete and reinforced concrete", **Engineering**, 114, 342-344, 1922.
- Li, M., Qian, C. and Sun, W., "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", **Cement and Concrete Research** 34, 1001-1005, 2004.
- Lin, W.M., Lin, T.D. and Powers-Couche, L.J., "Microstructures of fire-damaged concrete", **ACI Materials Journal** 93(3), 199-205, 1996.
- Luo, X., Sun, W. and Chan, S.Y.N., "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete", **Cement and Concrete Research** 30, 379-383, 2000.
- Morsy, M.S., Galal, A.F. and Abo-El Enein, S.A., "Effect of temperature on phase composition and microstructure of artificial pozzolona-cement pastes containing burnt kaolinite clay", **Cement and Concrete Research** 28, 1157-1163, 1998.
- Myers, D., Surfactant Science and Technology, **John Wiley & Sons Inc**, U.S.A., 2006.
- Neville, A.M., Properties of concrete, **Longman Scientific and Technical**, New York, USA, 2000.
- Peng, G.F., Chan, S.Y.N. and Anson M., "Chemical Kinetics of C-S-H Decomposition in Hardened Cement Paste Subjected to Elevated Temperatures up to 800°C", **Advances in Cement Research** 13, 47-52, 2001.
- Perkins, P.H., Repair, protection and waterproofing, of concrete structures, **Elsevier Applied Science Publishers Ltd.**, England, 1986.
- Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. and Wu G., "Cyclic heating and cooling effects on concrete durability", **Concrete Durability** 126, 1285-1304, 1991.
- Riley, M.A., "Possible new method for the assessment of fire damaged concrete", **Magazine of Concrete Research** 43, 87-92, 1991.
- Sakr, K. and EL-Hakim, E., "Effect of temperature or fire on heavy weight concrete properties", **Cement and Concrete Research** 35, 590-596, 2005.

Savva, A., Manita, P. and Sideris, K.K., “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”, **Cement & Concrete Composites** 27, 239-248, 2005.

Schrefler, B.A., Gawin, D., Khoury, G.A. and Majorana, C.E., Physical, mathematical & numerical modelling, **International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete**, Udine, Italy, 2003.

Shoab, M.M., Ahmed, S.A. and Balaha, M.M., “Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars”, **Cement and Concrete Research** 31, 1533-1538, 2001.

Simon, M. J., Jenkins, R. B. and Hover, K. C., “The influence of immersion vibration on the void system of air entrained concrete, durability of concrete”, **G. M. Idorn International Symposium, ACI Special Publication**, 99-126, 1992.

Şahin, Y., Hava sürükleyici katkıların karakterizasyonu ve deney koşullarının betonun donma-çözülme hasarına etkisi, Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, s. 51-55, 2013.

Topçu, İ.B. ve Demir, A., “Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi”, **7. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, s. 455-463, 28-30 Kasım, 2007.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.

TS EN 934-2, Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için- Bölüm 2: Beton katkıları- Tarifler ve özellikler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2011.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.

TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 13501-2, Yapı mamulleri ve bina elemanları – Yangın sınıflandırması Bölüm 2: Yangına dayanım deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma (Havalandırma tesisatları hariç), **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.

TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2012.

TS EN 206-1 A1, Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2005.

TS EN 12350-5, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 12350-7, Beton- Taze beton deneyleri- Bölüm 7: Hava içeriğinin tayini- Basınç metotları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

Vodak, F., Trtik, K., Kapickova, O., Hoskova, S. and Demo P., “The effect of temperatures on strength-porosity relationship for concrete”, **Construction and Building Materials** 18, 529-534, 2004.

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures; Research and development laboratories of the portland cement association”, **Journal of American Concrete Institute** 47, 433-444, 1951.

Whiting, D.A. and Nagi, M.A., Manual on control of air content in concrete, **Portland Cement Association (PCA EB116)**, Skokie, Illinois, USA, 1998.

Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C.S. and Anson, M., “Impact of high temperature on PFA concrete”, **Cement and Concrete Research** 31, 1065-1073, 2001.

Yamazaki, N., Yamazaki, M. and Mocida, T., “Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures”, **Nuclear Engineering and Design** 138, 121- 138, 1995.

Yüzer N., Aköz F., Öztürk L.D. ve Kızıllkanat A.B., “Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Çimento Harcında Hasar Oranının Renk Ölçümü ile Araştırılması”, **TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi**, İstanbul, s. 461-470, 1-3 Ekim, 2003.

Yüzer, N., Aköz, F. and Öztürk, L.D., “Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature”, **Cement and Concrete Research** 34, 1803-1807, 2004.

Zhang, B., Bicanic, N., Pearce, C.J. ve Philips, D.V., “Relations between Brittleness and Moisture Loss of Concrete Exposed to High Temperatures”, **Cement and Concrete Research** 32, 363-371, 2002.

Zoldners, N.G., “Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”, **ACI Publication SP-25** (8), 1-31, 1971.

## ÖZ GEÇMİŞ

Ahmad Wali AMIRY 1990’de Afganistan’ın Mazare sharif ilinde doğdu. 2009’da Kayseri Mustafa Germirli Anadolu İmam Hatip lisesini bitirdi. 2010 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bu bölümden Haziran 2014’te mezun olan AMIRY, aynı yıl Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2015 yılında Niğde Açık Ceza İnfaz Kurumu konut projesinde Kontrol Mühendisi olarak çalıştı.



