



## Effect of hot water curing on the mechanical properties and durability of cement mortars incorporating silica fume

Ceren Ince

Civil Engineering Program, Center for Sustainability, Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus, Kalkanlı, Guzelyurt, North Cyprus, via Mersin 10, Turkey

### Highlights:

- Determination of the curing temperature of cement mortars containing silica fume
- Hot water curing on the micro- and macro-structural properties of cement based materials
- Mechanical properties and durability of cement mortars containing silica fume cured under hot water

### Keywords:

Cement mortars  
incorporating silica fume  
Hot water curing  
Mechanical properties  
Durability

### Article Info:

Research Article  
Received: 12.07.2018  
Accepted: 26.11.2018

### DOI:

10.17341/gazimmfd.442764

### Acknowledgement:

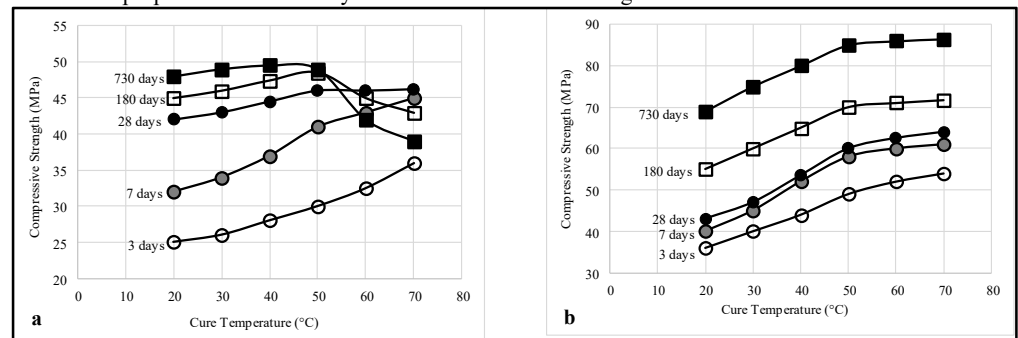
Middle East Technical University, Northern Cyprus Campus (Scientific Research Project Code: FEN-16-YG-11) and Central Laboratory, Middle East Technical University.

### Correspondence:

Author: Ceren Ince  
e-mail: iceren@metu.edu.tr  
phone: +90 392 661 2927

### Graphical/Tabular Abstract

It is known that curing temperature plays an important role on the fresh and hardened properties of cement-based materials. The increase in curing temperature at early period results in an accelerated hydration reaction to occur and enables increase in the rate of strength development of cement-based materials. However, the application of very high temperatures during curing negatively affects the strength and durability of the cement-based materials generally due to the expansion that takes place in the matrix. Despite the diversity of literature studies done in this area, the extent to which cement hydration and pozzolanic reaction of cement based materials are affected by hot water curing conditions has not been comprehensively investigated. The main purpose of the study hence is to examine the effects of early period of hot water curing on the mechanical properties and durability of cement mortars containing silica fume.



**Figure A.** Compressive strength of cement mortars against increasing curing temperatures at various times; a, cement mortars; b, cement mortars incorporating 30% silica fume

**Purpose:** The main purpose of this article is to investigate the effects of the early period of hot water curing on the mechanical properties and durability characteristics of cement mortars incorporating silica fume.

### Theory and Methods:

Particle size distribution, chemical composition and scanning electron microscope analyses were carried out to characterize the materials used in this study. Compressive strength, porosity, water penetration depth, resistance to freeze and thaw as well as resistance to carbonation are experimentally measured in this paper.

### Results:

The results suggest that the most favourable curing environment at early period for cement mortars incorporating silica fume is to cure under water at 50°C. The increase in the curing temperature resulted in an increase in the compressive strength of cement mortars incorporating silica fume. Porosity and water penetration depth of cement mortars incorporating silica fume decreased dramatically and resistance to freezing and thawing as well as the resistance to carbonation are enhanced significantly at cure temperature of 50°C.

### Conclusion:

The results reported in this article make a significant contribution to the determination of suitable curing temperature of cement mortars incorporating silica fume.



## Sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçlarının mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisi

Ceren İnce\*

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Programı, Kuzey Kıbrıs Kampusu, Kalkanlı, Güzelyurt, K.K.T.C.

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Puzolan takviyeli çimento esaslı malzemelerin etkin kür ortamlarının belirlenmesi
- Sıcak su kür uygulamasının silis dumanı takviyeli çimento harçlarının mekanik özellikleri ve dayanıklılığı üzerindeki etkisi
- Sıcak su kür uygulaması yapılan silis dumanı takviyeli çimento harçlarının taramalı elektron mikroskopu analizleri ile içyapı gelişiminin incelenmesi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.07.2018

Kabul: 26.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.442764

#### Anahtar Kelimeler:

Silis dumanı takviyeli çimento harçları, sıcak su kürü, mekanik özellikler, dayanıklılık

#### ÖZET

Kür sıcaklığının çimento esaslı malzemelerin taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Çimentonun erken dönemde kür sıcaklığının artması daha hızlı hidrasyon reaksiyonunun oluşmasına ve böylece çimento esaslı malzemelerin dayanım kazanma hızının artmasına olanak tanımaktadır. Ancak kür sırasında çok yüksek sıcaklıkların uygulanması, çimento esaslı malzemelerin, genellikle matris içinde oluşan genişlemeye bağlı olarak, dayanım ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Makalenin başlıca amacı silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisini incelemektir. Çalışmada ilk önce tane büyüklüğü dağılımı, kimyasal bileşim ve taramalı elektron mikroskopu analizleri gerçekleştirilerek malzeme karakterizasyonu yapılmıştır. Ön sonuçlar, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde su içerisinde 50°C sıcaklıkta muhafaza edilmesinin en elverişli kür ortamı olduğu yönündedir ve yapılan taramalı elektron mikroskopu analizleri ile uyumludur. Sonuçlar, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin, mekanik özelliklerin ve dayanıklılığın kazanımında önemli bir rol oynadığına işaret etmektedir. Makalede raporlanan sonuçlar, puzolan takviyeli çimento esaslı malzemelerin uygun kür ortamlarının belirlenmesinde önemli katkı sağlamaktadır.

## Effect of hot water curing on the mechanical properties and durability of cement mortars incorporating silica fume

### H I G H L I G H T S

- Determining the effective curing conditions of cement based materials incorporating silica fume
- Effect of the application of hot water curing on the mechanical properties and durability of cement mortars incorporating silica fume
- Examining the microstructural development of hot water cured cement mortars incorporating silica fume using scanning electron microscope analysis

#### Article Info

Research Article

Received: 12.07.2018

Accepted: 26.11.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.442764

#### Keywords:

Cement mortars incorporating silica fume, hot water curing, mechanical properties, durability

#### ABSTRACT

It is known that curing temperature plays an important role on the fresh and hardened properties of cement-based materials. The increase in curing temperature at early period results in an accelerated hydration reaction that increases the rate of strength development of cement-based materials. However, the application of very high temperatures during curing negatively affects the strength and durability of the cement-based materials generally due to the expansion that takes place in the matrix. The main purpose of the study is to examine the effects of early period of hot water curing on the mechanical properties and durability of cement mortars incorporating silica fume. Particle size distribution, chemical composition and SEM analyses were performed for material characterization. Preliminary results suggest that the most favourable curing environment at early period for cement mortars incorporating silica fume is to cure under water at 50°C and are in a good agreement with SEM. The results indicate that curing cement mortars incorporating silica fume under hot water in the early times plays an important role in the development of mechanical properties and durability. The results reported in this article provide a significant contribution for the determination of suitable curing conditions of cement-based materials incorporating pozzolans.

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: iceren @metu.edu.tr / Tel: +90 392 661 2927

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İyi bir beton elde etmek için, karışımın yerleştirilmesinin ardından, sertleşmenin ilk aşamalarında malzemenin uygun bir ortamda kürlenmesi gerekmektedir. Kürlleme, çimento hidrasyonunu teşvik etmek için kullanılan prosedüre verilen addır ve betonun sertleşmiş özelliklerinin kazanımı sırasında, beton sıcaklığının ve nem hareketinin beton içerisinde doğru kontrolünü sağlamaktadır [1]. James vd. [2] çeşitli kür metodlarının betonun basınç dayanımı üzerindeki etkilerini çalışmıştır. Çalışmada suya daldırarak kürlenmenin betonun basınç dayanımı için en etkili yol olduğu raporlanırken, ıslak kaplama yapılmasının ve sulamanın da bu metodu izleyen en etkili yöntemler olduğu vurgulanmıştır. Chithra and Dhinakaran [3] sıcak su ve sıcak hava kürlerinin performanslarını araştıran çalışmalarında her iki metodun da betonun çekme ve basınç dayanımını artırdığını göstermişlerdir. Sıcak su kürlünün, sıcak hava kürlüne kıyasla betonun mekanik özelliklerini daha fazla artırdığı da raporlanan sonuçlar arasında yer almaktadır. Beton kürlünün geciktirilmesinin beton özellikleri üzerindeki zararlı etkileri çok önceden bilinmektedir. Örneğin Al-Anı ve Al-Zaiwary [4] 1988'de yayınlanan çalışmada beton kürlünün, özellikle de ilk gün gecikmesinin, betonun sertleşmiş özelliklerini olumsuz yönde etkilediğini raporlanmıştır. Tighare ve Singh [5] su kürlü, buhar kürlü ve normal kür şartlarının beton üzerindeki etkilerini karşılaştıran bir çalışma gerçekleştirdiler. Bu çalışmada suya daldırarak kürlenmenin betonun basınç dayanımı için en etkili yol olduğu raporlanmaktadır. Kür bileşikleri ya da ıslak kaplama yapılması gibi yöntemlerin 7 gün boyunca uygulanmasının nihai basınç dayanımının kazanımında çok büyük rolü olduğu çalışmada çıkan en önemli bulgular arasındadır. Soroka vd. [6] yaptıkları çalışmada buhar kürlünün uzun vadede beton özelliklerini olumsuz etkilediğini ve bu olumsuzluğa başlıca sebep olarak da bu numunelerde buhar kürlüne ilaveten su ile kürlenmesinin de yapılmadığını raporlamıştır. Su ile kürlenmenin buhar kürlünü takip etmemesi beton numunelerde porozitenin artmasına ve iç çatlakların meydana gelmesine sebebiyet vermiştir.

Prem vd. [7] kür rejimlerinin ultra yüksek performanslı betonun basınç dayanımına olan etkilerini araştırmışlardır. Ambiyant hava kürlü, suda kürlleme ve sıcak havada kürlleme çalışılan kür rejimleri arasında yer almaktadır. Çalışmada termal kür rejiminin özellikle de puzolan katkılı betonlar üzerindeki etkisi raporlanmaktadır. Termal kür rejimi silis dumanı gibi puzolanik yapıda olan malzemelerin sadece dolgu malzemesi olarak değil aynı zamanda aktif bağlayıcı olarak rol almalarını da sağlamaktadır. Bu sonuç ultra yüksek performanslı betonun basınç dayanımında ciddi derecede artış olmasına olanak tanımaktadır. Bushlaibi ve Alshamsi [8] sıcak ve sonrasında kuru ortamlarda kürlleme yapılmasının çimento matrisi içerisinde aşırı derecede su buharlaşmasına sebebiyet verdiğini raporlamıştır. Bu durum hidrasyon ürünlerinin matris içerisinde düzgün dağılımını zorlaştırmakta ve dolayısı ile betonun mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Paulik [9] kürlleme rejiminin,

özellikle erken yaşta, yüksek mukavemetli betonun basınç dayanımı gelişiminde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Çalışmada ayrıca standart kür rejimlerinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesinin inşaatların yapımı sırasında hız kazanabilmek açısından da önemli olabileceği vurgulanmaktadır. Zhang vd. [10] yapılan çalışmada su kürlünün beton kaldırım plakalarının mukavemet kazancını büyük ölçüde artırdığını vurgulamıştır. Çalışmada ayrıca kuru kürlleme rejiminin eğilme dayanımı için en zararlı kür koşulu olduğu da raporlanmıştır.

Literatüre bakıldığı zaman, farklı kür koşullarının özellikle de puzolan takviyeli çimento esaslı malzemeler üzerindeki etkisinin sınırlı sayıda çalışıldığı görülmüştür. Örneğin Hussain vd. [11] uçucu kül katkılı betonlarda, özellikle puzolanik reaksiyonun devam edebilmesi için ortaya çıkan su ihtiyacı dolayısı ile kür hassasiyetinin arttığı sonucunu ortaya koymuştur. Khatib [12] erken dönemde nemli kür yapılmasının cüruf takviyeli betonlarda daha düşük su emme katsayısı değerlerinin elde edilmesi açısından avantajlı olduğunu raporlamıştır. Çalışmada ayrıca erken dönemde nemli kür uygulanan betonlarda cüruf miktarının artmasının gözenek hacminin belirgin bir şekilde azalmasına olanak tanıdığı da raporlanmıştır. Ho vd. [13] raporlanan çalışmada normal portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ile yapılan karışımlarda buhar kürlünün bu numunelerde poroziteyi belirgin derecede artırdığını belirtmiştir. Bu çalışmada test edilen silis dumanı içeren karışımlar ise, yüksek basınç dayanımı ve düşük sorptivite özellikleri sayesinde en iyi performansı vermişlerdir. Khatri vd. [14] kürlenmenin silis dumanı takviyeli betonların su geçirgenliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada, yirmi sekiz günlük aralıklı kürlenmenin, 7 gün süren sürekli nemli kürlleme kadar geçirgenliği azaltmada etkili olduğu bulunmuştur. He vd. [15] buhar kürlünün betonun özelliklerini ve iç yapısını olumsuz yönde etkilediğini raporlamıştır. Çalışmada buna karşılık, buharla kürlleme işlemi ardından beton numunelerin su altında kürlenmesi, gözenekliliğin önemli ölçüde azaldığına işaret etmektedir. Maslehuddin vd. [16] yapmış oldukları çalışmada çeşitli kür bileşikleri kullanılarak kürlenmiş silis dumanı katkılı betonların rötre geriminin azaldığını ve korozyona dayanıklılığın arttığını raporlamıştır. Hooton ve Titherington [17] Portland çimentosu ile hazırlanan betonunun klorür penetrasyon direncinin hızlandırılmış kür şartlarından olumsuz yönde etkilendiğini raporlamaktadır. Diğer yandan sonuçlar silis dumanı ve fırın cürufu takviyeli betonların hızlandırılmış kür şartlarına daha dayanıklı olduklarını ve klorür penetrasyon direncini kötü yönde etkilemediği yönündedir. Vu vd. [18] çalışmasında sünmenin yüksek kür sıcaklıklarında arttığını raporlamıştır. Bu çalışmada yüksek kür sıcaklıklarında artış gösteren sünmenin temel sebebinin çimento macununda meydana gelen zayıf mekanik özellikler ile birlikte ve düşük elastisite modülü olduğu raporlanmaktadır. Literatürde, çeşitli kür koşullarının puzolan ve çimento takviye malzemeleri eklenerek oluşturulan betonların mekanik ve özellikle durabilite özelliklerine etkileri çok fazla raporlanmamıştır [19]. Çimento esaslı malzemelerin nihai mühendislik

özelliklerinin ve performansının mikro-yapısal sıcaklıklardan büyük ölçüde etkilendiği göz önünde bulundurulursa [20, 21], bu bölümde özetlenen literatür çalışmalarının çeşitliliğine rağmen, sıcak su kürünün puzolan takviyeli çimento esaslı malzemeler üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde ele alınmadığı görülmektedir. Makalenin başlıca amacı silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisini incelemektir. Bu çalışma öncelikle, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının en uygun kür ortamının belirlenmesi için olası kür koşullarının incelenmesi ile başlamaktadır. Çalışmada incelenen harçlar 7 farklı gruba ayrılarak, su içerisinde 20, 30, 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta kürlenmişlerdir. Bu süreden sonra tüm harç numuneler 20°C sıcaklıkta su tankına yerleştirilerek, test gününe kadar kürlenmeye devam etmişlerdir. Sonuçlar, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde su içerisinde 50°C sıcaklıkta muhafaza edilmesinin en elverişli kür ortamı olduğu yönündedir ve yapılan taramalı elektron mikroskobu analizleri ile uyumludur. Çalışmanın bundan sonraki bölümlerinde sıcak su kürü, numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki 14 gün boyunca 50°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmesini ile tanımlanmaktadır. Sıcak su kürüne maruz bırakılan tüm numuneler 14üncü günden sonra 20°C sıcaklıktaki su kürüne yerleştirilerek, belirlenen test gününe kadar muhafaza edilmişlerdir. Standart su kürü ise numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra belirlenen test gününe kadar 20°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmesini ile tanımlanmaktadır. Makalede daha sonra, erken dönemde sıcak su kürü uygulanan numunelerin artan silis dumanı ikame seviyesinin mekanik özelliklerine etkisi çalışılmıştır. Erken dönemde uygulanan sıcak ve standart su kür şartlarının bu harçlar üzerindeki mekanik özellikleri de karşılaştırılmıştır. Sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçlarının içyapı değişimlerini daha iyi anlayabilmek için taramalı elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Erken dönemde sıcak su kürü uygulanan numunelerde artan silis dumanı ikame seviyesinin porozite ve su işleme derinliği üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Çalışmada ayrıca sıcak su kürü uygulamasının silis dumanı takviyeli çimento harçlarının dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemek için donma ve çözünme direnci ve karbonatlaşma derinliği de ölçülmüştür.

## 2. MALZEME VE KARIŞIM TASARIMI (MATERIALS AND MIX DESIGN)

Çimento (CEM I), silis dumanı ve ince agrega bu çalışmada araştırılan çimento harçlarının temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Portland çimentosu ASTM C150 / C150M-16 [22] ile uyumlu olup, Adana Çimento Ltd.'ten tedarik edilmiştir. Çimentoya kısmi takviye malzemesi olarak kullanılan silis dumanı ise ASTM C1240-15 [23] ile uyumlu olup, Kıbrıs Çevre İşletmeleri Ltd.'ten (Cyprus Environmental Enterprises) temin edilmiştir. Çimento harç karışımları sabit hacim oranlarına bağlı olmak suretiyle su: çimento: kum (0.72:1:2) kullanılarak elde edilmiştir. Dolayısı ile karışım oranları ağırlıkça su: çimento: kum 1: 1.509: 4.666 olmaktadır. Standart 40×40×160 mm ebatlı 6 adet kiriş numune dökme üzere 576 gram su, 856 gram

çimento ve 2688 gram kum kullanılmıştır. Silis dumanı çimentoya takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Standart 40×40×160 mm ebatlı 6 adet kiriş numune dökümü sırasında 10%, 20% ve %30 silis dumanı takviyeleri için sırasıyla 25,6 gram, 51,2 gram ve 76,8 gram silis dumanı kullanılmıştır. Takviye miktarları hacimsel olarak %10, %20 ve %30'dur. Her malzemenin genel yoğunluğu ölçüldükten sonra istenilen karışım oranlarını üretmek için gerekli olan ham madde kütlesi hesaplanmıştır. Harç karışım prosedürü için bir kanatlı karıştırıcı mikser kullanılmıştır. Mikser içerisine önce su ve daha sonra çimento yerleştirilerek, bu malzemeler bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Silis dumanı ve kum daha sonra bir dakika boyunca mikser kademeli olarak ilave edilmiştir. Çimento harcı karışımı sonra bir dakika daha karıştırılmıştır. Toplam 10 dakikalık bir karışım süresi elde edilecek şekilde karıştırma işlemi 7 dakika daha sürdürülmüştür. Çalışmada sıcak su kürü, numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki 14 gün boyunca 50°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmesini ile tanımlanmaktadır. Sıcak su kürüne maruz bırakılan tüm numuneler 14üncü günden sonra 20°C sıcaklıktaki su kürüne yerleştirilerek, belirlenen test gününe kadar muhafaza edilmişlerdir. Standart su kürü ise numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra belirlenen test gününe kadar 20°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmesini ile tanımlanmaktadır.

## 3. DENEYSEL PROSEDÜR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

### 3.1. Basınç Dayanımı Ölçümü (Measurement of Compressive Strength)

Harç numuneler, istenilen süre ve kür ortamı şartlarında muhafaza edildikten sonra, ASTM C109 / C109M-16'da [24] belirtilen standart basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Raporlanan her basınç dayanımı değeri, istenilen kür ortamında muhafaza edilmek şartı ile belirlenen test gününde 3 özdeş numunenin ortalaması alınarak saptanmıştır. Basınç dayanımı ölçümleri, 5 µm<sup>1</sup> sabit vuruş hızı uygulanacak şekilde gerçekleştirilmiştir [24].

### 3.2. Mikroyapısal Analiz (Microstructural Analysis)

Farklı kür ortamlarında muhafaza edilmiş, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının mikroyapısal analizi, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektron ışınının altında şarjı azaltmak için numunelerin üzerine ince bir altın platin alaşımı tabakası püskürtülmüştür. Çalışmada, farklı kür sıcaklıklarının basınç dayanımı üzerine etkisini daha iyi kavramak ve ölçülen mekanik özellikleri geçerli kılabilmek için taramalı elektron mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 3.3. Porozite Ölçümü (Measurement of porosity)

Silis dumanı takviyeli çimento harçlarının porozitelerinin belirlenmesi, ASTM D4404-10'da [25] tarif edildiği gibi civalı Porosimetri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu teknik, kontrollü bir basınç altında, gözenekli harç numunelerde progresif civa intrüzyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Civanın yüksek yüzey gerilimi, kapiler

etki ile çimento esaslı malzemelerin gözeneklerine nüfuz etmesine engel teşkil etmekte ve bu nedenle civa, harici bir basınç altında numune içine zorlanmaktadır. Porlara nüfuz etmek için gereken basınç, gözenek büyüklüğü ile orantılıdır ve dolayısıyla, test edilen harç numunelerin poroziteleri bu yöntem ile belirlenebilmektedir [25]. Haçların porozite ölçümleri numuneler istenilen kür şartlarında 2 yıl boyunca muhafaza edildikten sonra gerçekleştirilmiştir.

### 3.4. Su İşleme Derinliği Ölçümü (Measurement of water penetration depth)

Farklı kür ortamlarında muhafaza edilmiş, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının su işleme derinliği, numuneler istenilen kür şartlarında 2 yıl süre ile muhafaza edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. İstenilen kür şartlarında muhafaza edilen numunelerin, su basıncına maruz kalacak yüzeyleri, BS EN 12390-2'de [26] izah edildiği gibi tel fırça ile pürüzlendirilmiştir. Harç numuneler, su işleme derinliği test cihazına yerleştirildikten sonra  $(72 \pm 2)$  saat boyunca  $500 \pm 50$  kPa'lık bir su basıncına maruz bırakılmışlardır. 72 saat sonunda numuneler, su işleme derinliği test cihazından hemen alınarak, yarmada çekme dayanımı test düzeneğine, su basıncının uygulandığı yüzey dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra numuneler yarıya bölünen yüzeyleri kullanılarak maksimum su işleme derinlikleri ölçülmüştür. Su işleme derinliği ölçümleri BS EN 12390-8'de [27] göre kaydedilmiştir.

### 3.5. Donma ve çözülme karşı direnci (Resistance to freezing and thawing)

Silis dumanı takviyeli çimento harçlarının donma ve çözülme karşı direnci, numunelerin erken dönemde istenilen kür şartlarında muhafaza edilip, daha sonra 2 yıl süre ile donma ve çözülme kabinetinde muhafaza edilmelerinde sonra gerçekleştirilmiştir. Silis dumanı takviyeli çimento harçlarının donma ve çözülme karşı direnci ASTM C666 / C666M-15'te [28] verilen standart prosedüre uygun olarak ve standart donma ve çözme kabinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Donma ve çözülme kabinesi içinde sıcaklık günde iki döngü yapacak şekilde  $-30^{\circ}\text{C}$  ile  $+30^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkları arasında ve bağıl nemin %75 ile %85 aralığında muhafaza edilmiştir. Donma ve çözülme kabinesi her 24 saatte iki ardışık donma ve çözme döngüsünü gerçekleştirmek üzere ayarlanmıştır. Numunelerin 2 yıl süre ile donma-çözülme kabinetinde günde iki ardışık döngü gerçekleştirmeleri, yaklaşık olarak toplam 1460 döngüye maruz bırakıldıklarına işaret etmektedir. Erken dönemde farklı kür ortamlarında muhafaza edilmiş çimento harçlarının donma ve çözülme direnci, basınç dayanımı kaybı hesaplanarak belirlenmiştir. Test edilen harçların basınç dayanımı kaybı, numunelerin normal şartlarda kürlenmiş basınç dayanımları referans alınarak ve standart basınç dayanımı test makinesi kullanılarak belirlenmiştir.

### 3.6. Karbonatlaşma Derinliği Ölçümü (Measurement of carbonation depth)

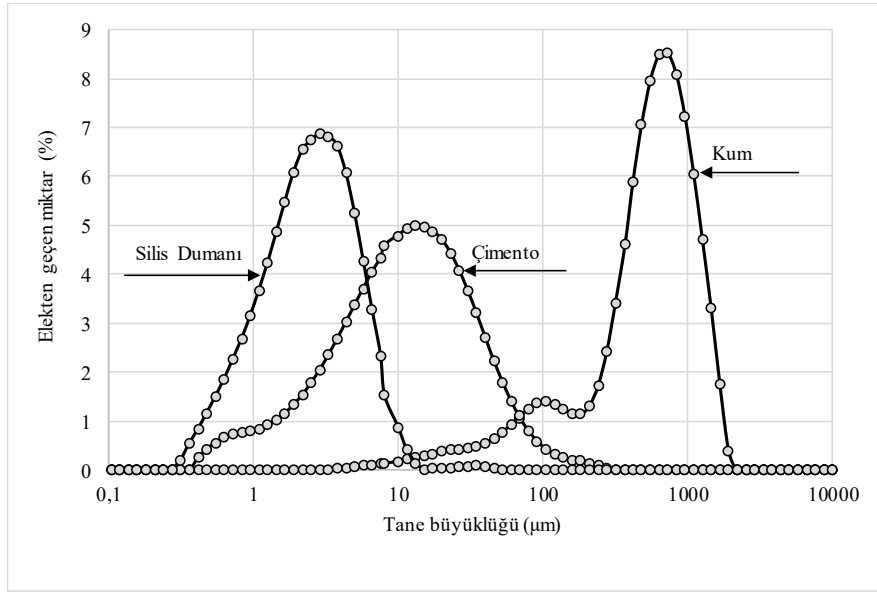
Karbonatlaşma derinliği ölçümleri, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde belirlenen kür şartlarına

maruz bırakılmalarını takiben, 2 yıl boyunca  $24^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta ve %65 bağıl nem içeren bir karbonasyon kabinetinde muhafaza edilmeleri sonrasında gerçekleştirilmiştir. Numuneler karbonasyon kabinetinde hacimce %20  $\text{CO}_2$  konsantrasyonuna maruz bırakılmışlardır. 2 yıl boyunca karbonasyon kabinetinde muhafaza edilen çimento harcı numuneleri daha sonra bu kür ortamından çıkarılarak eğilmede çekme dayanımı test düzeneği kullanılarak yaklaşık olarak ortadan ikiye bölünmüştür.  $40 \times 40 \times 160$  mm ebatlarında olan numunelerin kırık yüzeylerine fenolftalein çözeltisi püskürtülerek asidik-bazik bölge ayrımı yapılmıştır. Numunelerin karbonatlaşan kısımları renklenmemiş, ancak çimento harcı örneklerinin karbonatsız kısımlarında pembemsi bir renk elde edilmiştir. Karbonatlaşma derinliği, çimento harçlarının dış yüzeyi ile koyu gri renkteki bölgenin sınır çizgisi arasında kalan kalınlık ölçülerek tanımlanmıştır. Ortalama karbonatlaşma derinliği, numunenin kırık yüzünün tüm karbonatlı tarafları dikkate alınarak hesaplanmıştır [29].

## 4. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

### 4.1. Malzeme karakterizasyonu çalışması (Material characterisation study)

Malzeme karakterizasyonu çalışması, tane büyüklüğü dağılımı, kimyasal bileşim ve mikroskop analizlerini içermektedir. X-ışını flüoresansı'ndan elde edilen hammaddelerin element analizi Tablo 1'de özetlenmiştir. Tablo 1'de sunulan veriler, bu çalışmada kullanılan silis dumanı bileşiminin %95'inden fazlasının silikon (Si), alüminyum (Al) ve demir (Fe) içeren fazlardan oluştuğunu ve dolayısı ile yüksek pozulanik aktivite özelliği gösterdiğini işaret etmektedir. Çimento ve kum için belirlenmiş olan elementler ve oranları bu malzemelere ait tipik sonuçlardır. Çimento harcı oluşturmak için kullanılan malzemelerin parçacık boyutu dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Silis dumanının parçacık boyutu dağılımı, kullanılan çimento ve kum ile karşılaştırıldığında, yüksek incelik göstermektedir. Silis dumanının Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi ile ölçülen özgül yüzey alanının  $23,65 \text{ m}^2/\text{g}$  olması da bu malzemenin inceliğini bir kere daha doğrulamaktadır. Silis dumanı ve çimentonun fiziksel özellikleri Tablo 2'de özetlenmiştir. Düşük yoğunluğu ve özgül ağırlığı ayrıca yüksek yüzey alanı gibi özellikleri silis dumanının çimentoya uygun bir ikame malzemesi olduğunu bir kere daha doğrulamaktadır. Çimento ve silis dumanının taramalı elektron mikroskop analizleri sırasıyla Şekil 2a ve Şekil 2b'de verilmektedir. Çeşitli boyutlarda öğütülmüş çimento klinker parçacıkları Şekil 2a'da görülmektedir. Şekil 2a'ya daha dikkatli bakıldığında çimento tane boyutunun alt-mikron ile yaklaşık olarak 20 mikron arasında olduğu görülmektedir. Taramalı elektron mikroskop analizinde görülen çimento tane boyutu, Şekil 1'de verilen parçacık boyut dağılımı ile büyük bir uyum içindedir. Şekil 2b'de silika dumanı partiküllerinin tipik bir görüntüsünü gösterilmektedir. Bu partiküller nano boyutlu olup, aralıkları 100nm ile yaklaşık 400nm arasındadır. Taramalı elektron mikroskop analizinde silis dumanı parçacık büyüklüğünün 400 nm'ye kadar görülmesi dikkat çekici bir sonuçtur.



Şekil 1. Parçacık boyutu dağılımı (Particle size distribution)

Parçacık boyutu dağılımı analizi sırasında silis dumanının küçük parçacıklarının kümelenmesi gözlenen yüksek parçacık boyutu ile tutarlıdır.

**Tablo 1.** Kullanılan malzemelerin element analizi  
(Elemental analysis of the used materials)

| Kimyasal Bileşim               | Çimento (%) | Silis Dumanı (%) | Kum (%) |
|--------------------------------|-------------|------------------|---------|
| CaO                            | 43,8        | 1,26             | 0,46    |
| ZnO                            | 0,01        | 0,04             | -       |
| SiO <sub>2</sub>               | 30,2        | 92,8             | 91,9    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11,4        | 0,68             | 3,91    |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,11        | 1,95             | 0,65    |
| SO <sub>3</sub>                | 3,29        | 0,14             | 0,04    |
| MgO                            | 2,61        | 0,95             | 0,14    |
| K <sub>2</sub> O               | 1,34        | 1,28             | 1,31    |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,74        | -                | 0,83    |
| Na <sub>2</sub> O              |             | 0,24             | 0,49    |
| MnO                            | 0,43        | 0,07             | 0,04    |
| Cl                             | 0,03        | 0,03             | 0,01    |

**Tablo 2.** Silis dumanı ve çimentonun fiziksel özellikleri  
(Physical properties of silica fume and cement)

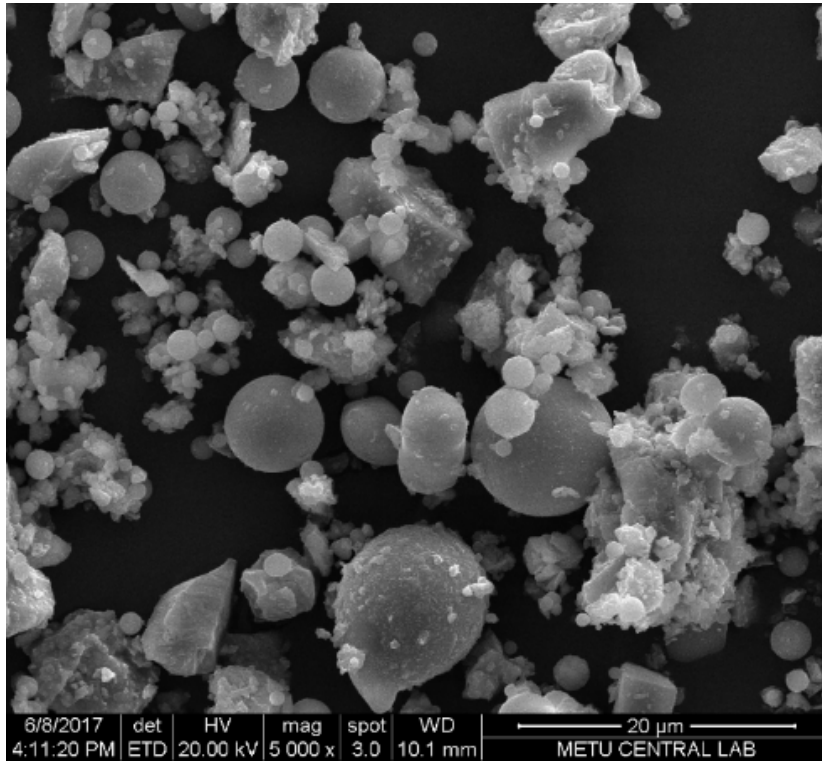
| Fiziksel özellikler                | Silis dumanı    | Çimento |
|------------------------------------|-----------------|---------|
| Kuru yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> ) | 433             | 1255    |
| Özgül ağırlık                      | 2,3             | 3,2     |
| Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /kg)   | 150,000-300,000 | 380     |

#### 4.2. Olası kür koşullarının incelenmesi (Examining the possible cure conditions)

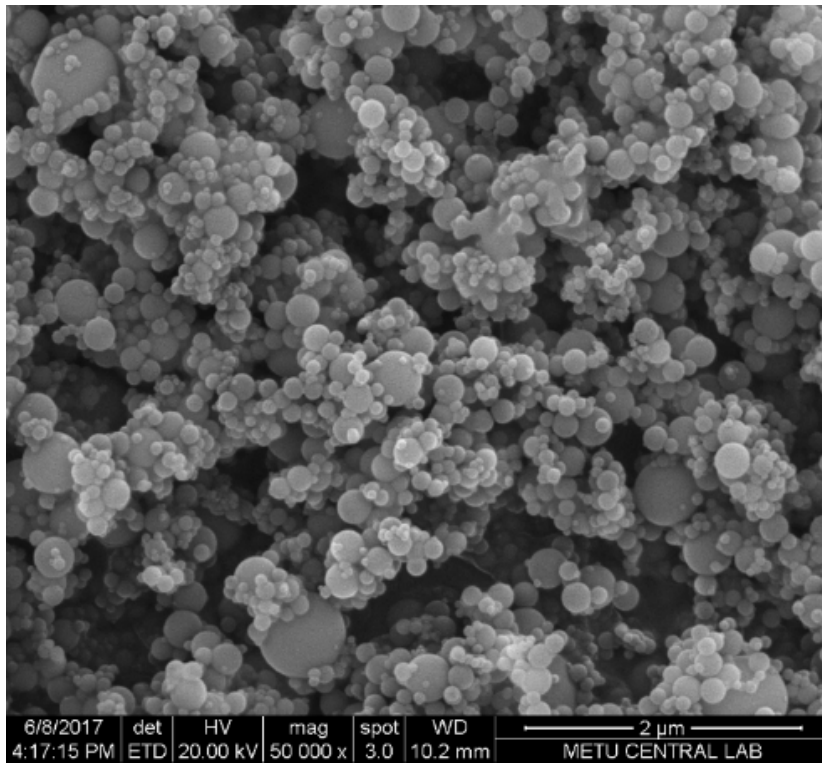
Bu çalışma, çimento ve silis dumanı takviyeli çimento harçlara uygulamak üzere, en uygun kür ortamının belirlenmesi için olası kür koşullarının incelenmesi ile başlamaktadır. Çalışmada çimento harçları ve silis dumanı takviyeli çimento harçları kullanıldığından, bu bölüm için

kontrol mahiyetinde olan çimento harcı ve en yüksek ikame oranı olarak kullanılan %30 silis dumanı takviyeli çimento harcı kullanılmıştır. Dökümden sonra, harç numuneler 1 gün boyunca 20°C sıcaklıkta ve bağlı nemin ~%95 olduğu laboratuvar ortamında kürlenmesinin ardından kalıplardan çıkarılmıştır. Sonraki 14 gün boyunca harçlar 7 farklı gruba ayrılarak, su içerisinde 20, 30, 40, 50, 60 ve 70°C sıcaklıkta kürlenmiştir. Bu süreden sonra tüm harç numuneler 20°C sıcaklıkta su içerisinde yerleştirilerek, test gününe kadar kürlenmeye devam etmiştir. Numuneler daha sonra 3, 14, 28, 180 ve 730 günlük yaşlarda kür havuzundan alınarak, basınç dayanımı testine maruz bırakılmıştır.

3, 14, 28, 180 ve 730 gün boyunca farklı su sıcaklıklarında kürlenmiş çimento kontrol harçlarının (0% silis dumanı) ve %30 silis dumanı içeren çimento harçlarının basınç dayanımları sırasıyla Şekil 3a ve Şekil 3b'de gösterilmiştir. Şekil 3a'da gösterilen sonuçlara bakıldığında kür suyu sıcaklığı artışının çimento harçlarının basınç dayanımını genellikle artırdığı görülmektedir. Çimento harçlarının erken yaşlarda basınç dayanımı, artan kür suyu sıcaklığı ile daha doğrusal bir artış göstermektedir. Ancak 180 ve 730'uncu günlerde elde edilen basınç dayanımı sonuçları, çimento harçlarının ~50°C üzerinde kür suyu sıcaklığı uygulamasına elverişli olmadığı yönündedir. Bu sıcaklıklardan sonra çimento harçlarının basınç dayanımlarında ciddi bir azalma görülmektedir. Çimento hidratasyon ürünlerinin, yüksek sıcaklıklarda kürlendikleri ve yeterli neme maruz bırakıldıkları zaman genişleyen bir davranış sergileyebildikleri çok iyi bilinmektedir [19]. Meydana gelen genişleme, çimento harçlarında önce iç çatlaklara daha sonra da betonun kırılmasına, mukavemet kaybına, servis ömrünün kısalmasına ve dayanıklılık problemlerine neden olmaktadır. Makalede verilen bu sonuçlar ayrıca, yüksek kür sıcaklıklarının genellikle beton dayanımını düşürdüğünü raporlayan çalışmalar ile büyük bir uyum içerisinde [30-32].

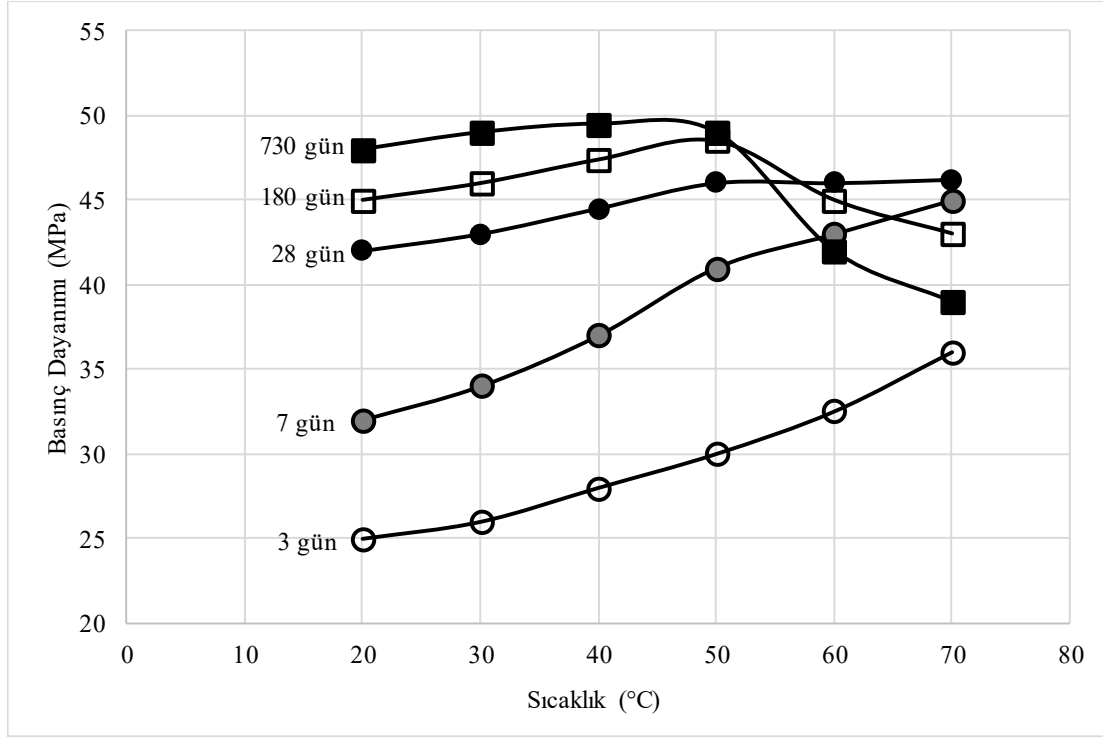


a) Çimento (*Cement*)

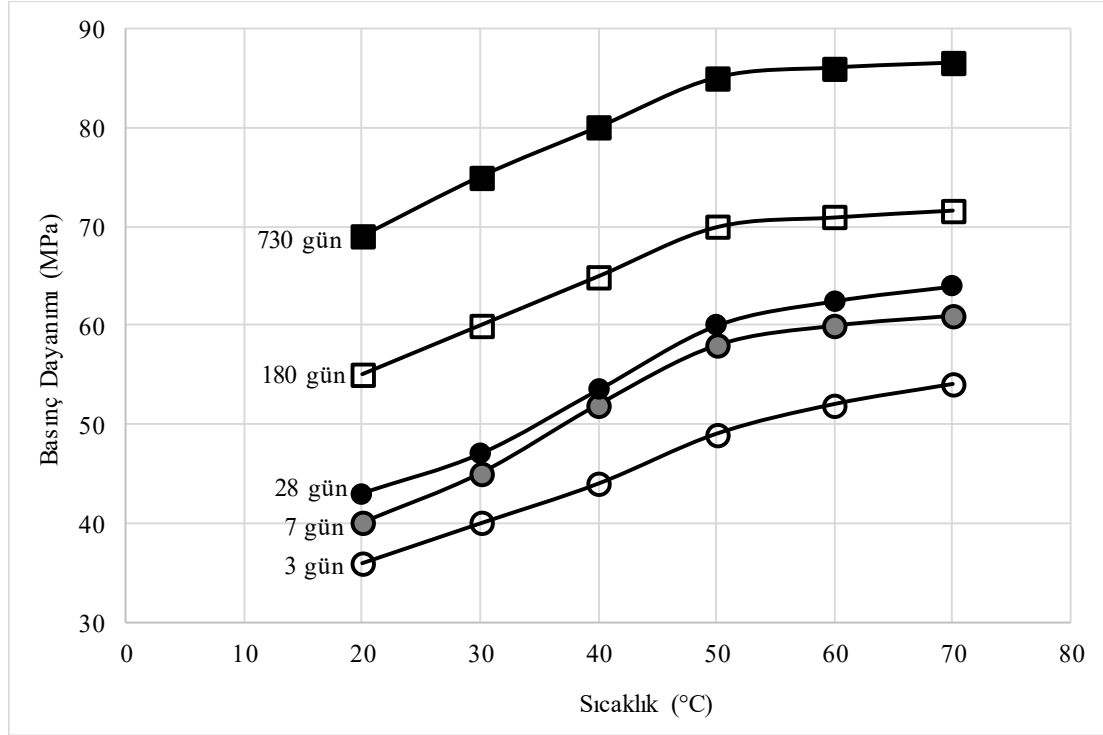


b) Silis dumani (*Silica fume*)

Şekil 2. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) çimento (b) silis dumani  
(*Scanning electron microscope images (a) cement (b) silica fume*)



a)



b)

**Şekil 3.** a) Çeşitli zamanlarda çimento harçlarının artan kür sıcaklıklarına karşı basınç dayanımları b) Çeşitli zamanlarda silis dumanı takviyeli çimento harçlarının artan kür sıcaklıklarına karşı basınç dayanımları

((a) Compressive strength of cement mortars with increased curing temperatures at various times (b) Compressive strength of cement mortars incorporated silica fume with increased curing temperatures at various times)



Şekil 3b'de 3, 14, 28, 180 ve 730 gün boyunca farklı su sıcaklıklarında kürlenmiş %30 silis dumanı içeren çimento harçlarının basınç dayanımları verilmektedir. Sonuçlar, erken yaşlarda artan kür suyu sıcaklığının silis dumanı takviyeli çimento harçlarının basınç dayanımını sistematik bir şekilde artırdığı yönündedir. 50°C'den daha yüksek kür suyu sıcaklıklarının silis dumanı takviyeli çimento harçlarının uzun vadede basınç dayanımını önemli ölçüde artırmadığı da elde edilen bulgular arasındadır. Silis dumanı takviyeli çimento esaslı malzemelerin kür sırasında ısı rejime tabi tutulmasının silis dumanını daha fazla aktive ettiği ve böylelikle bağlayıcılık özelliğinin artırıldığı Prem vd.'de [7] raporlanmıştır. Prem vd.'de [7] verilen silis dumanı takviyeli çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı artışları, Şekil 3b'de gösterilen dayanım artışları ile uyumludur.

Şekil 3a ve Şekil 3b'de verilen kür sıcaklıkları ile değişkenlik gösteren basınç dayanımı sonuçlarını daha iyi kavramak ve geçerli kılabilmek için taramalı elektron mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir. Çimento harcı ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 14 gün boyunca, su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürendikten sonra 20°C sıcaklıkta su içerisine yerleştirilerek 28inci günde gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskop analizleri sırasıyla Şekil 4a ve Şekil 4b'de verilmektedir. Çimento bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum-silikat-hidrat kristallerinin her iki numunede de çokça yer aldığı görülmektedir. Ancak silis dumanı takviyeli çimento harcı numunesinde kalsiyum-silikat-hidrat kristallerine daha yoğun bir şekilde rastlanması, kür suyu sıcaklığının hem çimento hidratasyonunu hem de puzolanik reaksiyonu hızlandırdığına işaret etmektedir. Şekil 3b'de verilen %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 28 günlük basınç dayanımının (60MPa), Şekil 3a'da verilen çimento harcının 28 günlük basınç dayanımından (46MPa) daha yüksek olması, taramalı elektron mikroskop analizleri ile uyumludur. Çimento harcı ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 14 gün boyunca, su içerisinde 70°C sıcaklıkta kürlenmesinin ardından 20°C sıcaklıkta su içerisine 730 gün muhafaza edildikten sonra gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskop analizleri sırasıyla Şekil 4c ve Şekil 4d'de verilmektedir. Yoğun içyapısına rağmen, 70°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento harcında genleşmeye bağlı çatlaklar gözlenmiştir. Şekil 4d'de verilen %30 silis dumanı takviyeli çimento harcında bu tür bir çatlak yapısına rastlanmamaktadır. Ayrıca %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının içyapısının daha yoğun ve boşluksuz olduğu da görülmektedir.

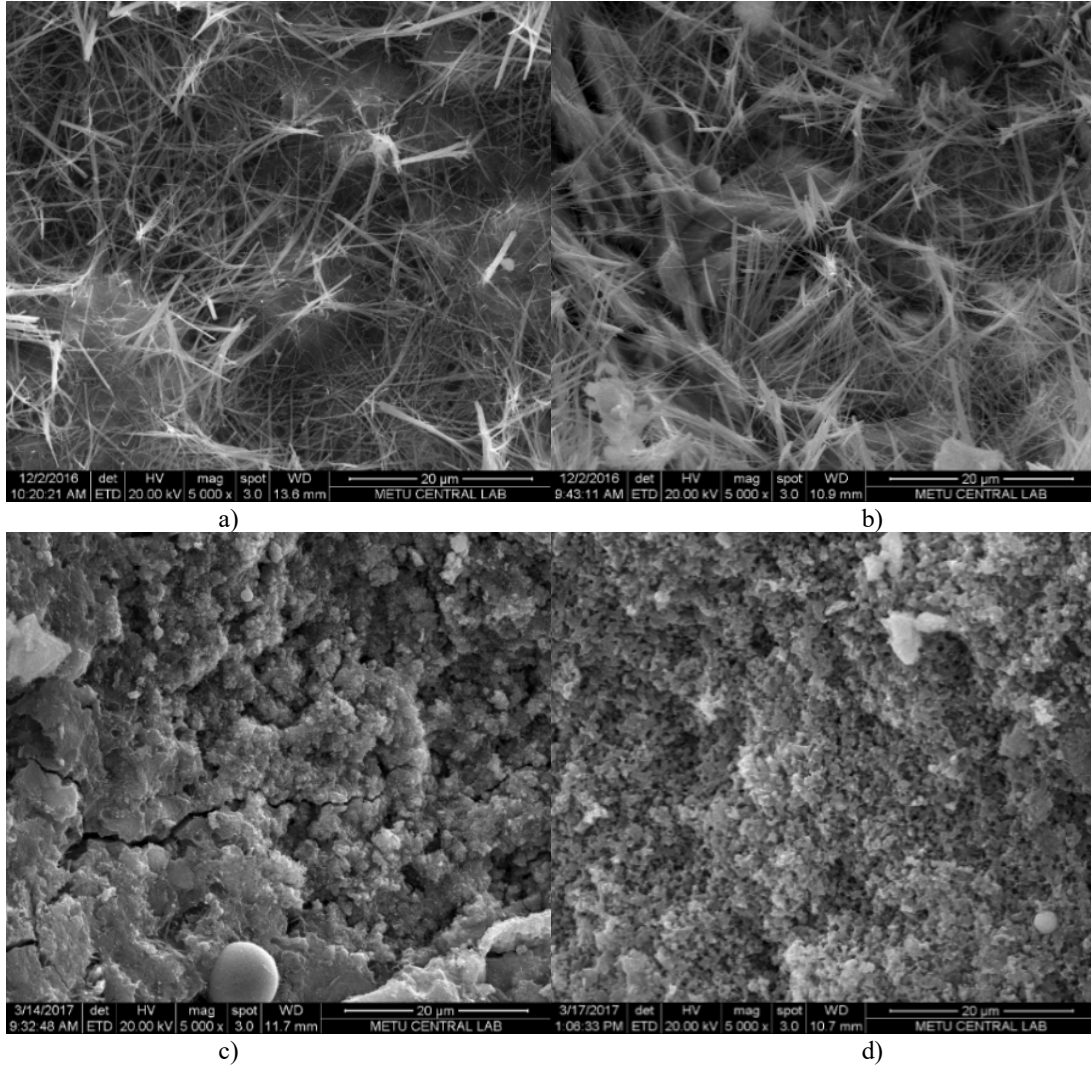
Şekil 3 ve Şekil 4'te verilen sonuçlar, hem çimento hem de silis dumanı katkı çimento harçlarının 50°C'den daha yüksek su sıcaklıklarında kürlenmesinin elverişli olmadığı yönündedir. Sıcak ve standart su kür şartlarının silis dumanı takviyeli çimento harçları üzerindeki etkisinin daha iyi anlaşılması ve gerekli karşılaştırmaların yapılabilmesi için çalışmada incelenen kür şartları iki ana gruba ayrılmıştır. Birinci kür şartı; numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonraki 14 gün boyunca 50°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmesini

ile tanımlanmaktadır. 14'üncü günden sonra numuneler 20°C sıcaklıktaki su içerisine yerleştirilerek, belirlenen test gününe kadar muhafaza edilmiştir. İkinci kür şartı ise; numunelerin kalıptan çıkarıldıktan sonra direk olarak 20°C sıcaklıkta su içerisine yerleştirilerek test gününe kadar muhafaza edilmesini içermektedir.

#### 4.3. Basınç dayanımı (Compressive strength)

Bu bölümde öncelikle çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının basınç dayanımları incelenmiştir. Harçlar önce 14 gün boyunca 50°C sıcaklıkta su içerisinde kürendikten sonra 20°C sıcaklıktaki su içerisinde 2 yıl süre ile muhafaza edilmiştir. Şekil 5'te verilen sonuçlara bakıldığında silis dumanı ikame seviyesindeki artışın çimentonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Çimento kontrol harcına kıyasla, %10 silis dumanı takviye edilmesi, 2 yılda bu numunelerin basınç dayanımında %36'lık bir artışa olanak tanımaktadır. İkame oranının %30'a çıkarılması ise basınç dayanımını %70'ten çok artırmaktadır. Artan kür sıcaklıklarının puzolan takviyeli çimento esaslı malzemelerin dayanımını erken dönemde artırdığı Escalante-Garcia vd. [33] ayrıca Luke ve Glasser'de de [34] raporlanmış ve Şekil 5'te verilen bulgularla uyum göstermiştir. Ancak sıcak su kürünün çimento esaslı malzemelerin uzun vadede dayanımları üzerindeki etkisi pek çalışılmamıştır. Diğer yandan, Wang vd. [35] yapmış olduğu çalışmada erken dönemde ısı kür rejimine tabi tutulan çimento harçlarının bu malzemelerdeki gözenek yapısının iyileşmesine bağlı olarak dayanımlarında da uzun vadede artış olduğunu raporlamış ve Şekil 5'te verilen sonuçlarla büyük bir benzerlik göstermiştir. Şekil 5'te verilen sonuçlar, çimento kontrol harcının basınç dayanımında kısa vadede önemli bir artış gösterirken, 28 günden sonra ölçülen basınç dayanımı değerlerinde kayda değer bir artış yaşanmadığını göstermektedir. Wang vd. [35] erken yaşlarda yüksek sıcaklıkta kürlenmenin, çimentonun erken hidratasyonunu hızlandırdığını, ancak daha sonraki hidratasyon reaksiyonlarını olumsuz etkileyerek matrisin içyapısında büyük gözeneklere yol açtığını raporlamıştır. Şekil 5' verilen sonuçlar Wang vd. [35] ile uyum içerisindedir.

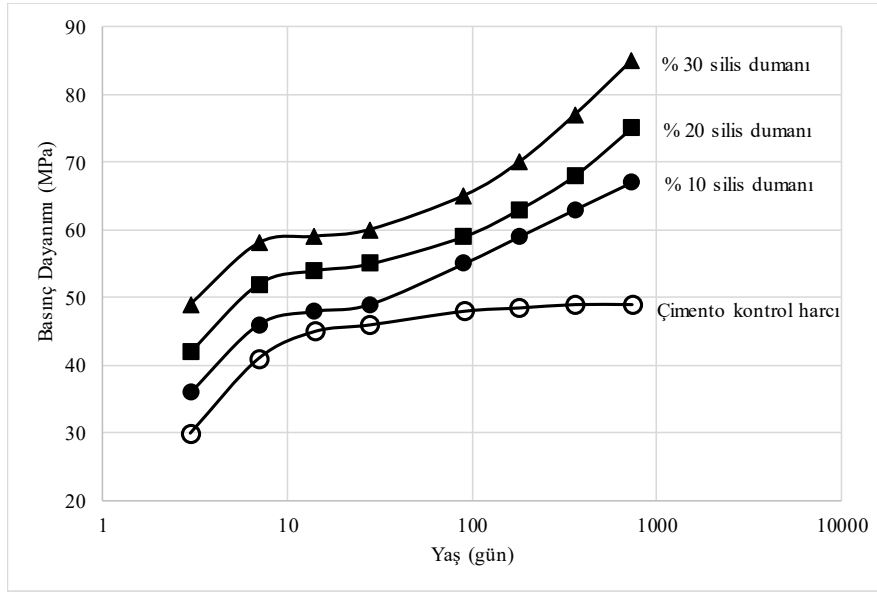
Şekil 6'da önce 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürendikten sonra 20°C sıcaklıkta su içerisinde 2 yıl süre ile muhafaza edilen çimento kontrol ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçları, direk olarak 20°C sıcaklıkta su içerisinde 2 yıl süre ile muhafaza edilen numuneler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6'da gösterilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere, erken yaşta sıcak su kürüne tabi bırakılan çimento harçlarının basınç dayanımları, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımlarından daha düşüktür. Bu durum çimento matrisi içerisinde sıcak su uygulamasına bağlı olarak genleşmenin meydana gelmeye başladığı ve içyapıda oluşmaya yüz tutmuş hasarların basınç dayanımının artışına engel olduğu yönündedir. Ancak silis dumanı takviyeli çimento harçlarında bu durum tam terstir. Sıcak su kürüne tabi tutulan %30 silis dumanı takviyeli



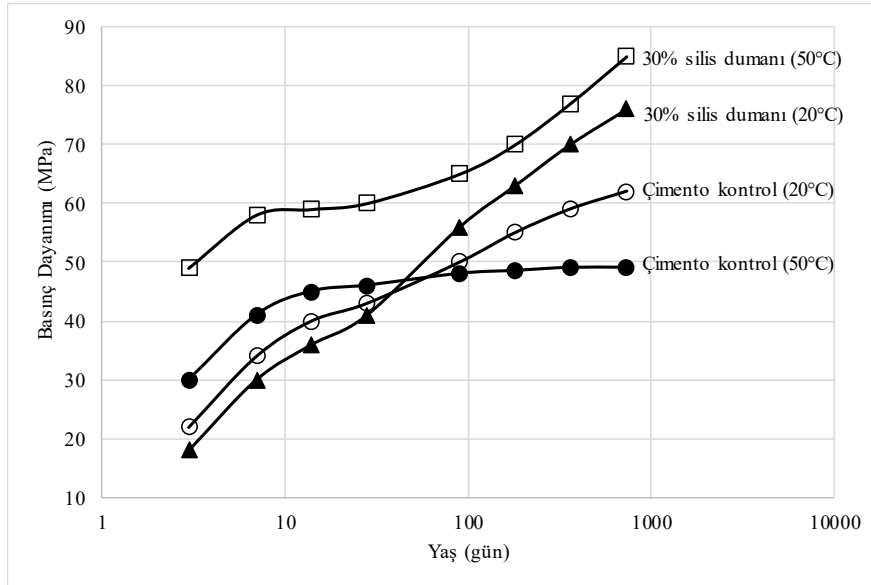
**Şekil 4.** Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) 50°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento harcının 28'inci gün gerçekleştirilen mikroskop analizi b) 50°C sıcaklıkta kürlenmiş %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 28'inci gün gerçekleştirilen mikroskop analizi c) 70°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento harcının 730'uncu gün gerçekleştirilen mikroskop analizi d) 70°C sıcaklıkta kürlenmiş %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 730'uncu gün gerçekleştirilen mikroskop analizi (Scanning electron microscope images (a) Microscope analysis of cement mortars cured at 50°C at 28th days (b) Microscope analysis of cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 50°C at 28th days (c) Microscope analysis of cement mortars cured at 70°C at 730th days (d) Microscope analysis of cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 70°C at 730th days)

çimento harcının basınç dayanımı, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş özdeş numuneden daha yüksektir. Şekil 6'da gösterilen sonuçlar ayrıca silis dumanının çimento hidrasyonu üzerindeki etkisinin kür suyu sıcaklığına ve silis dumanı ikame oranına bağlı olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, daha yüksek kür sıcaklıkları uygulandığında (50°C üzeri), silis dumanının puzolanik reaksiyonu daha çok önem kazanmaktadır. Bu aşamada puzolanik reaksiyon, matris içinde mevcut olan suyun tüketilmesinde çimento hidrasyonu ile rekabet etmektedir. Bu durum hidrasyon reaksiyonunun engellenmesi ile sonuçlanabilir ve böylelikle hem çimento hidrasyonu hem de puzolanik reaksiyon bu koşullarda olumsuz etkilenebilir [36]. Şekil 6'da verilen sonuçlar genel olarak erken dönemde uygulanan sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçları üzerinde daha etkili olduğu yönündedir.

Şekil 6'da gösterilen kür sıcaklıkları ile değişkenlik gösteren silis dumanı takviyeli çimento harçlarının iç yapısını daha iyi kavrayabilmek için taramalı elektron mikroskop analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 7a ve Şekil 7b'de sırasıyla, 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürendikten sonra 20°C sıcaklıkta su içerisinde 2 yıl süre ile muhafaza edilen numuneler ile direkt olarak 20°C sıcaklıkta su içerisinde 2 yıl süre ile muhafaza edilen %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının taramalı elektron mikroskobu analizleri verilmektedir. Sonuçlara bakıldığında, erken dönemde sıcak su kürüne tabi tutulan silis dumanı takviyeli çimento harcının, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş harca kıyasla çok daha yoğun ve boşluksuz bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu bulgular erken dönemde uygulanan sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçları üzerinde daha etkili olduğunu işaret etmektedir. Bu sonucun en büyük gerekçesi



**Şekil 5.** 50°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının farklı zamanlarda ölçülen basınç dayanımları  
(Compressive strength of cement control and cement mortars incorporating 10%, 20% and 30% silica fume cured at 50°C at different times)



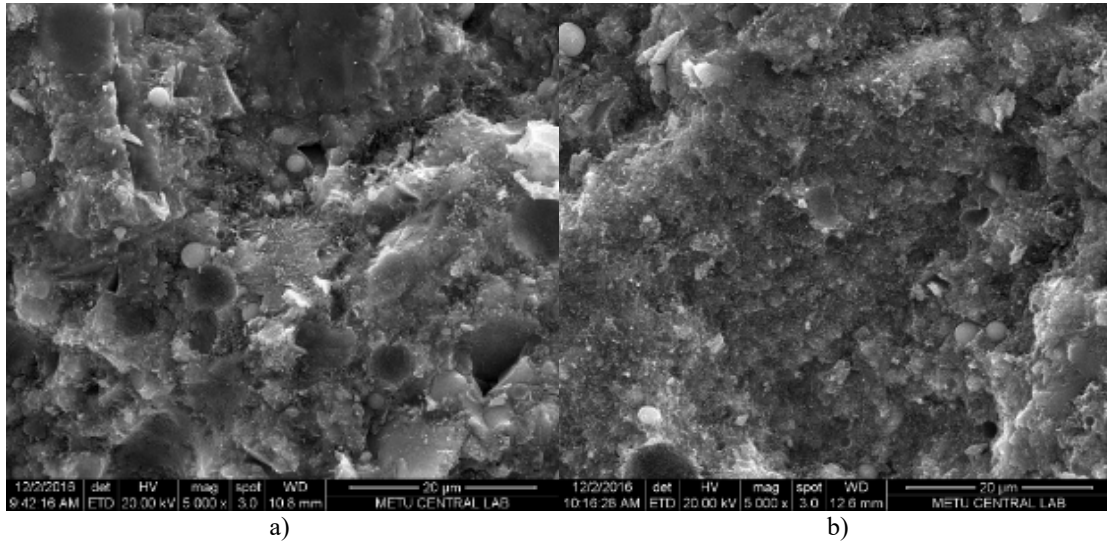
**Şekil 6.** Farklı sıcaklıkta kürlenmiş çimento kontrol ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının çeşitli zamanlarda ölçülen basınç dayanımları  
(Compressive strength of cement control and cement mortars incorporating 30% silica fume cured at various temperatures at different times)

ise sıcak su kürünün hem çimento hidrasyonunu hem de puzolanik reaksiyonu hızlandırarak, kalsiyum-silikat-hidrat kristallerinin matris içerisinde daha yoğun oluşumuna olanak tanınmasıdır. Şekil 7a ve Şekil 7b'de verilen taramalı elektron mikroskop analizleri, Şekil 6'da gösterilen basınç dayanımı sonuçları ile büyük bir uyum içindedir.

#### 4.4. Porozite (Porosity)

Çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının porozite değerleri Tablo 3'de

verilmektedir. Harçlar daha önce bahsedildiği gibi, önce 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlendikten sonra 20°C sıcaklıkta su içerisine yerleştirilmiştir. Harçların porozite ölçümleri numuneler 2 yıl boyunca kürlendikten sonra gerçekleştirilmiştir. Tablo 3'de verilen sonuçlara bakıldığında silis dumanı ikame seviyesindeki artışın çimentonun porozitesini sistematik bir şekilde düşürdüğü görülmektedir. Bu sonuçlar daha önce Şekil 5'te elde edilen basınç dayanımı sonuçları ile büyük bir uyum içerisindedir. Silis dumanı ikame seviyesinin artması kısa süreli sıcak su kürüne maruz bırakılan numunelerin daha yoğun bir çimento



**Şekil 7.** Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) 20°C sıcaklıkta kürlenmiş %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 730'uncu gün gerçekleştirilen mikroskop analizi b) 50°C sıcaklıkta kürlenmiş %30 silis dumanı takviyeli çimento harcının 730'uncu gün gerçekleştirilen mikroskop analizi.

(Scanning electron microscope images (a) Microscope analysis of cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 20°C at 730th days (b) Microscope analysis of cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 50°C at 730th days)

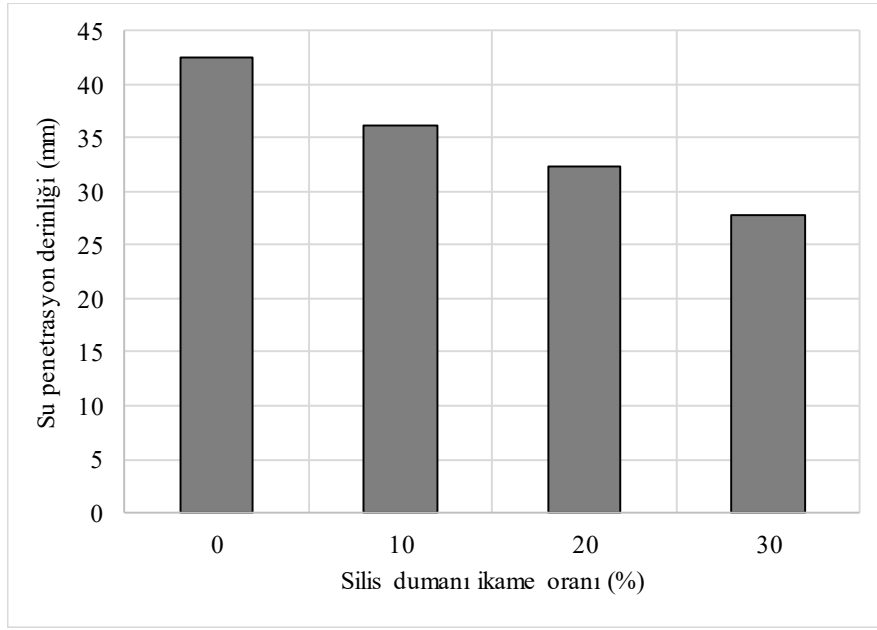
matrisine sahip olmalarını sağlamıştır. Bu tespit Şekil 7b'de verilen taramalı elektron mikroskobu analizinde de doğrulanmıştır. Sıcak su kürü hem çimento hidrasyonunu hem de puzolanik reaksiyonu hızlandırarak, matris içinde daha fazla kalsiyum-silikat-hidrat kristallerinin oluşumunu da desteklemektedir. Bu durum daha yoğun ve daha düşük poroziteli çimento harçlarının oluşumuna olanak tanımaktadır. Tablo 3'de ayrıca 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin porozite değerleri, direk olarak 20°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmiş numunelerin porozite değerleri ile karşılaştırılmıştır. Harçların porozite ölçümleri aynı şekilde numuneler 2 yıl boyunca kürlendikten sonra gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında zaman sıcak su kür uygulaması yapılan çimento kontrol harcının porozitesinde bir artış olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, sıcak su kürüne maruz kalan çimento harçlarının genişleme davranışı yapmaya başladığına ve 50°C sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda çimento harçlarının kürlenmemesi gerektiğine işaret etmektedir. Çimento matrisi içerisinde meydana gelen iç çatlaklar genel olarak poroziteyi artırmaktadırlar. Cao ve Detwiler [37] ayrıca Kjellsen vd.'de [38] raporlanan sonuçlar kür sıcaklıklarındaki artışın çimento pastasının porozitesini uzun vadede önemli derecede artırdığına işaret etmekte ve Tablo 3'de verilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Silis dumanı takviyeli çimento harçlarında bu durum tam terstir. Silis dumanı takviyeli çimento harcının sıcak su içerisinde kürlenmesi, çimento hidrasyonunu hızlandırmakla kalmayıp, hidrasyon sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit ile silis dumanının daha hızlı tepkimeye girmesine de imkân vermektedir. Bu durum çimento harçlarının porozitesinde ciddi bir düşüş göstererek daha yoğun bir matris elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu sonuçlar Caldarone vd.'de [39] raporlanan sonuçlar ile uyum içerisindedir.

**Tablo 3.** Porozite (*Porosity*)

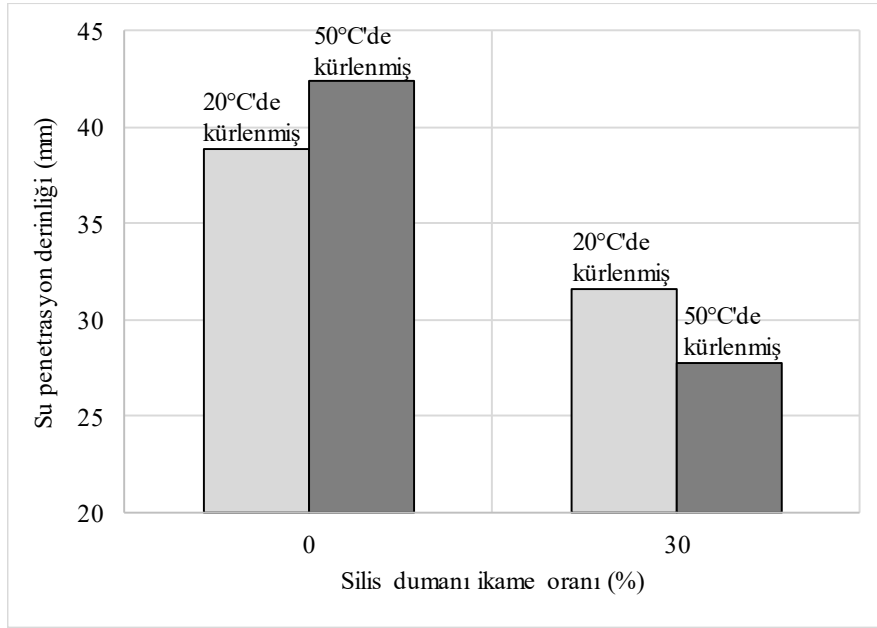
| Harç karışımı              | Kısa süreli kür ortamı | Porozite (%) |
|----------------------------|------------------------|--------------|
| Çimento                    | 50°C                   | 38,4         |
| Çimento + %10 Silis dumanı | 50°C                   | 30,6         |
| Çimento + %20 Silis dumanı | 50°C                   | 24,5         |
| Çimento + %30 Silis dumanı | 50°C                   | 18,3         |
| Çimento                    | 20°C                   | 32,3         |
| Çimento + %30 Silis dumanı | 20°C                   | 23,7         |
| Çimento                    | 50°C                   | 38,4         |
| Çimento + %30 Silis dumanı | 50°C                   | 18,3         |

#### 4.5. Su işleme derinliği (*Water penetration depth*)

Şekil 8a'da 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlendikten sonra 20°C sıcaklıkta su içerisinde yerleştirilen çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının su işleme derinlikleri verilmektedir. Harçların su işleme derinlikleri numuneler 2 yıl boyunca kürlendikten sonra gerçekleştirilmiştir. Şekil 8a'da verilen sonuçlara bakıldığında silis dumanı ikame seviyesindeki artışın çimentonun su işleme derinliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Porozitenin su işleme derinliğini etkileyen tek parametre olmadığı iyi bilirse de, sonuçlar su işleme derinliği ile porozite değerlerinin benzer eğilim gösterdiğini işaret etmektedir. Şekil 8a'da verilen sonuçlar ayrıca kısa süreli sıcak su kür uygulaması yapılan silis



a)



b)

**Şekil 8.** a) 50°C sıcaklıkta kürlenen çimento kontrol %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının su işleme derinlikleri b) 20°C ve 50°C sıcaklıkta kürlenen çimento kontrol ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının su işleme ((a) Water penetration depth of cement control and cement mortars incorporating 10%, 20% and 30% silica fume cured at 50°C (b) Water penetration depth of cement control and cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 20°C and 50°C)

dumanı takviyeli çimento harçlarının daha yoğun bir çimento matrisine sahip olduğu bulgusunu da desteklemektedir.

Şekil 8b'de 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenen ve direkt olarak 20°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenen çimento kontrol ve silis dumanı takviyeli çimento harç numunelerin su işleme derinlikleri karşılaştırılmıştır. Harçların su işleme derinlikleri numuneler 2 yıl boyunca

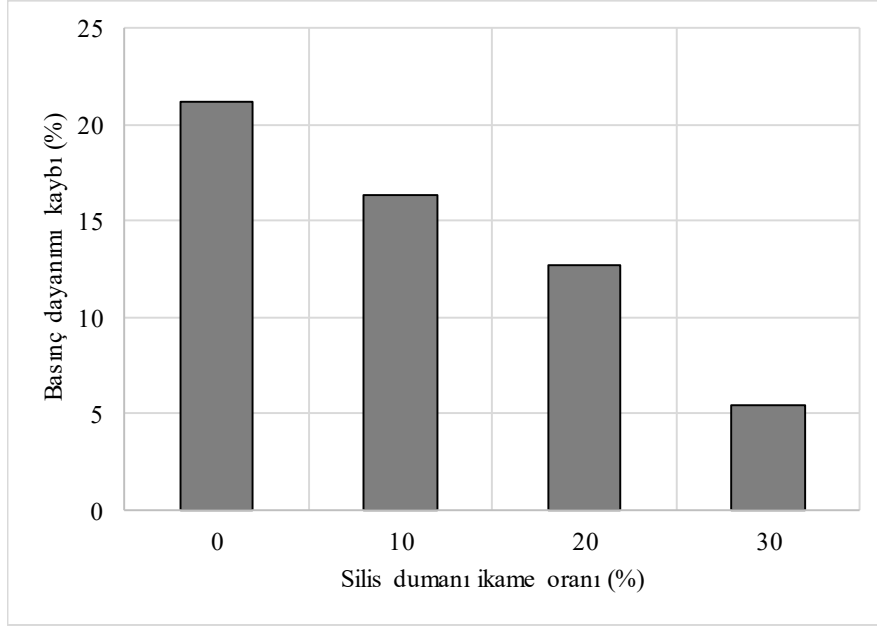
kürlendikten sonra gerçekleştirilmiştir. Şekil 8b'de verilen sonuçlara bakıldığı zaman sıcak su kür uygulaması yapılan çimento kontrol harcının su işleme derinliğinde bir artış olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, Tablo 3'de verilen ve aynı şartlarda kürlenmiş çimento harçlarının porozite değerleri ile uyum içerisindedir. Sıcak su kür uygulaması çimento harçlarında porozitenin artmasına neden olmaktadır. Artan porozite de dolayısı ile kapiler yollarla emilen çimento

matrisi içine nüfuz eden suyun penetrasyon derinliğini artırmıştır. Bu durum silis dumanı takviyeli çimento harçlarında tam terstir ve yine daha önce raporlanan porozite ve basınç dayanımı bulguları ile uyum içindedir. Silis dumanı takviyeli çimento harcının sıcak su içerisinde kürlenmesi, daha önce izah edildiği üzere, hem çimento hidratasyonunu hem de puzolanik reaksiyonun hızlandırmaktadır. Bu durum, daha yoğun bir içyapıya sahip

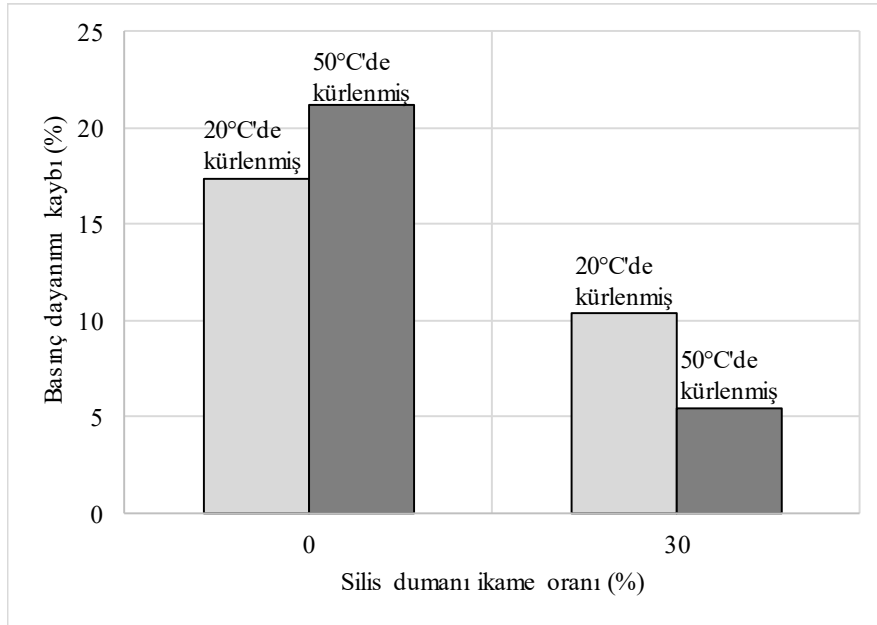
olan çimento harçlarının su işleme derinliğini önemli ölçüde azaltmaktadır.

#### 4.6. Donma ve çözülme etkisi (Effect of freezing and thawing)

Şekil 9a ve Şekil 9b'de incelenen numuneler önce 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenmiş ve sonra 28'inci güne kadar 20°C sıcaklıkta su içerisinde muhafaza



a)



b)

**Şekil 9.** a) 50°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının basınç dayanımı kaybı b) 20°C ve 50°C sıcaklıkta kürlenmiş çimento kontrol ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının basınç dayanımı kaybı

((a) Compressive strength loss of cement control and cement mortars incorporating 10%, 20% and 30% silica fume cured at 50°C (b) Compressive strength loss of cement control and cement mortars incorporating 30% silica fume cured at 20°C and 50°C)

edilmiştirler. Bu süreden sonra numuneler donma ve çözülme kabini içerisinde, günde 2 döngü yapacak şekilde bekletilmiştir. Şekil 9a'da çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının donma ve çözülme etkisi sonrası basınç dayanımı kaybı verilmektedir. Basınç dayanımı kaybı ölçümleri numuneler 2 yıl boyunca donma ve çözülme kabini muhafaza edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Şekil 9a'da verilen sonuçlara bakıldığında silis dumanı ikame seviyesindeki artışın basınç dayanımı kaybını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu sonuç, erken dönemde sıcak su altında kürlenmiş çimento harçlarında, silis dumanı ikame seviyesinin artmasının donma ve çözülmeye karşı direnci artırdığı yönündedir. Donma-çözülme etkisi sonucu çimento esaslı harç malzemelerde hava sıcaklıklarındaki değişimlere bağlı olarak hasarlar meydana geldiği bilinmektedir [1]. Oluşan hasarların başlıca nedeni çimento matrisi içerisindeki boşluklarda donan suyun hacminin artması ve buna bağlı olarak oluşan basınç sonrası harçlarda meydana gelen çatlaklar ve dayanım kaybıdır. Çimento harçlarının donma-çözülme etkisi altındaki performansı öncelikli olarak bu boşlukların miktarına, boşlukların çapına ve aralarındaki mesafeye bağlıdır. Daha önceki bölümlerde verilen sıcak su kür şartlarında elde edilen bulgular, silis dumanı ikame seviyesindeki artışın çimento harçlarının porozitesini ve su işleme derinliğini önemli ölçüde azalttığı yönündedir. Şekil 9a'da verilen silis dumanı ikame seviyesindeki artışın basınç dayanımı kaybını önemli ölçüde azalttığı sonucu daha önce raporlanan porozite ve su işleme derinliğini sonuçları ile büyük bir uyum içerisinde.

Şekil 9b'de 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenmiş ve direkt olarak 20°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmiş çimento kontrol ve silis dumanı takviyeli çimento harç numunelerinin donma ve çözülmeye karşı olan dirençleri karşılaştırılmıştır. Şekil 9a'da verilen sonuçlara benzer olarak, basınç dayanımı kaybı ölçümleri numuneler 2 yıl boyunca donma ve çözülme kabini muhafaza edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Şekil 9b'de verilen sonuçlara bakıldığı zaman sıcak su kür uygulaması yapılan çimento

kontrol harcında meydana gelen basınç dayanımı kaybı artışı, bu numunenin donma ve çözülme direncinde azalma olduğuna işaret etmektedir. Sonuçlar donma ve çözülme direncindeki azalmadan esasen sorumlu, bu harç numunelerdeki porozite artışı olduğunu desteklemektedir. Bu duruma tam ters olarak, sıcak su kür uygulaması yapılan silis dumanı takviyeli çimento harçlarının donma ve çözülmeye karşı daha dirençli oldukları, Şekil 9b'de görülen basınç dayanımı kaybı azalması ile anlaşılmaktadır. Makalede daha önce raporlandığı üzere sıcak su kür uygulamasına tabi tutulan silis dumanı takviyeli çimento harçlarının porozitelerinde kaydedilen düşüş bu durumdan esasen sorumludur.

#### 4.7. Karbonatlaşma Derinliği (Carbonation depth)

Tablo 3'te incelenen numuneler 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenmiş ve sonra 28'inci güne kadar 20°C sıcaklıkta su içerisinde muhafaza edilmiştir. Bu süreden sonra numuneler laboratuvarında, bağlı nemin yaklaşık %50 olduğu bir ortamda 2 yıl süre ile muhafaza edilmiştir. Tablo 4'te ilk önce çimento kontrol, %10, %20 ve %30 silis dumanı takviyeli çimento harçlarının karbonatlaşma derinlikleri verilmektedir. Tablo 4'te verilen sonuçlara bakıldığında silis dumanı ikame seviyesindeki artışın karbonatlaşma derinliğini önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Çimento harç numunelerinde karbonatlaşma özellikle kalsiyum hidroksit'in zamanla karbondioksit ile birleşerek karbonata dönüşmesi ile gerçekleşmektedir. Makalede daha önce raporlandığı üzere, sıcak su kür uygulamasına tabi tutulan silis dumanı takviyeli çimento harçlarının porozitelerinde kaydedilen düşüş, harçlarda karbondioksit difüzyonunu zorlaştırmaktadır. Dolayısı ile silis dumanı takviyeli çimento harç numunelerinde karbonatlaşma derinliği önemli ölçüde azalmıştır.

Tablo 3'te ayrıca 14 gün boyunca su içerisinde 50°C sıcaklıkta kürlenmiş ve daha sonra 28'inci güne kadar 20°C sıcaklıkta su içerisinde muhafaza edilen numunelerin karbonatlaşma derinlikleri, direkt olarak 20°C sıcaklıkta su

**Tablo 4.** Karbonatlaşma Derinliği (Carbonation depth)

| Harç   | Kısa süreli kür ortamı | Silis dumanı takviyeli çimento harçların karbonatlaşma derinliği |                              |
|--|------------------------|--|------------------------------|
|  |                        | Silis dumanı ikame düzeyi (%)                                    | Karbonatlaşma derinliği (mm) |
| Çimento  | 50°C                   | 0  | 14,6                         |
|  |                        | 10   | 9,0                          |
|  |                        | 20   | 7,2                          |
|  |                        | 30   | 3,6                          |
| Farklı kür şartlarına maruz kalmış çimento harçların karbonatlaşma derinliği |                        |  |                              |
| Harç   | Kısa süreli kür ortamı | Silis dumanı ikame düzeyi (%)                                    | Karbonatlaşma derinliği (mm) |
| Çimento  | 20°C                   | 0  | 9,5                          |
|  | 50°C                   | 0  | 14,6                         |
|  | 20°C                   | 30   | 6,8                          |
|  | 50°C                   | 30   | 3,6                          |

içerisinde kürlenmiş numunelerin karbonatlaşma derinlikleri ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4’te verilen sonuçlara bakıldığında zaman sıcak su kür uygulaması yapılan çimento kontrol harcının karbonatlaşma derinliğinde önemli bir artış olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, aynı numunede meydana gelen porozite ve su işleme derinliği artışı ile uyumludur. Artan porozite, çimento harcında karbondioksit difüzyonunu kolaylaştırdığından bu malzemelerin servis ömrünü negatif etkilemekle kalmayıp, alkali yapının yitirilmesi dolayısıyla donatı korozyonuna da sebebiyet verebilmektedir. Ancak porozitenin, sıcak su kür uygulamasına tabi tutulan silis dumanı katkı çimento harçlarında önemli ölçüde azalmış olması, karbondioksit difüzyonunu negatif yönde etkilemektedir. Dolayısıyla bu sonuçlar, sıcak su kür uygulamasına tabi tutulan çimento harçlarında silis dumanı takviye seviyesinin artmasının, karbonatlaşmaya karşı olan direnci artırdığı yönündedir.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmanın başlıca amacı silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisini incelemektir. Çalışmada ilk önce tane büyüklüğü dağılımı, kimyasal bileşim ve taramalı elektron mikroskopu analizleri gerçekleştirilerek kullanılan malzemelerin karakterizasyonu yapılmıştır. Çalışma öncelikle, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının en uygun kür ortamının belirlenmesi için olası kür koşullarının incelenmesi ile başlamaktadır. Ön sonuçlar, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde su içerisinde 50°C sıcaklıkta muhafaza edilmesinin en elverişli kür ortamı olduğu yönündedir. Yapılan taramalı elektron mikroskopu analizleri çimento harçlarının 50°C’den daha yüksek sıcaklıklarda kürlenmesinin matris içerisinde genişlemeye bağlı çatlaklar oluşturduğunu göstermiştir ancak %30 silis dumanı takviyeli çimento harcında bu tür bir çatlak yapısına rastlanmamıştır.

Çalışmada, silis dumanı ikame seviyesindeki artışın sıcak su kürü uygulanan çimento harçlarının basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığı görülmektedir. Diğer yandan çimento kontrol harcının basınç dayanımında kısa vadede önemli bir artış görülürken, 28 günden sonra ölçülen basınç dayanımı değerlerinde kayda değer bir artış yaşanmamıştır. Çalışmada raporlanan bulgular erken yaşta sıcak su kürüne tabi bırakılan çimento harçlarının basınç dayanımlarının, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin basınç dayanımlarından daha düşük olduğu yönündedir. Bu durum çimento matrisi içerisinde sıcak su uygulamasına bağlı olarak genişlemenin meydana gelmeye başladığı ve yapıda oluşmaya yüz tutmuş hasarların basınç dayanımının artışına engel olduğunu desteklemektedir. Ancak silis dumanı takviyeli çimento harçlarında basınç dayanımı, 20°C sıcaklıkta kürlenmiş numunenin basınç dayanımından daha yüksek olduğu ölçülmüştür. Çalışmada ortaya çıkan sonuçlar genel olarak erken dönemde uygulanan sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçları üzerinde daha etkili olduğu yönündedir ve yapılan taramalı elektron mikroskopu analizleri bu bulgular ile uyumludur.

Çalışmada ayrıca silis dumanı ikame seviyesindeki artışın çimentonun porozitesini ve su işleme derinliğini sistematik bir şekilde düşürdüğü görülmektedir. Bu sonuçlar elde edilen basınç dayanımı değerleri ve taramalı elektron mikroskopu analizlerini desteklemektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar sıcak su kür yapılmasının çimento kontrol harçlarının porozite ve su işleme derinliklerini artırdığı yönündedir. Ancak bu durum silis dumanı takviye edilmiş çimento harçları için tam terstir. Sıcak su kür uygulaması hem çimento hidrasyonunu hem de puzolanik reaksiyonu hızlandırarak, matris içinde daha fazla kalsiyum-silikat-hidrat kristallerinin oluşmasına dolayısıyla daha yoğun ve daha düşük poroziteli çimento harçlarının oluşumuna olanak tanımaktadır.

Silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin dayanıklılığa olan etkisini incelemek için donma ve çözülme direncine ilaveten karbonatlaşma derinliği de ölçülmüştür. Sonuçlar, erken dönemde sıcak su içerisinde kürlenmiş çimento harçlarında, silis dumanı ikame seviyesinin artmasının hem donma ve çözülmeye hem de karbonatlaşmaya karşı direnci artırdığı yönündedir. Makalede daha önce raporlandığı üzere sıcak su kür uygulamasına tabi tutulan silis dumanı takviyeli çimento harçlarının porozitelerinde kaydedilen düşüş bu durumdan esasen sorumludur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, silis dumanı takviyeli çimento harçlarının erken dönemde sıcak su kür şartlarında muhafaza edilmesinin, mekanik özelliklerin ve dayanıklılığın kazanımında önemli bir rol oynadığına işaret etmektedir. Makalede raporlanan sonuçlar, puzolan takviyeli çimento esaslı malzemelerin uygun kür ortamlarının belirlenmesinde önemli katkı sağlamaktadır.

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Çalışma, FEN-16-YG-11kodlu Bilimsel Araştırma Projesi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kuzey Kıbrıs Kampüsü tarafından desteklenmektedir. Yazar, ayrıca Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Merkez Laboratuvarı’na teşekkür eder.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Neville A.M., Properties of concrete, 5. Baskı, Pearson Education Limited, İngiltere, 2011.
2. James T., Malachi A., Gadzama E.W., Anamtemfiok V., Effect of curing methods on the compressive strength of concrete, Nigerian Journal of Technology, 30 (3), 14-20, 2011.
3. Chithra S. ve Dhinakaran G., Effect of hot water curing and hot air oven curing on admixed concrete, International Journal of ChemTech Research, 6 (2), 1516-1523, 2014.
4. Al-Ani S.H. ve Al-Zaiwary M.A.K., The effect of curing period and curing delay on concrete in hot weather, Materials and Structures, 21, 205-212, 1988.
5. Tighare P. ve Singh R.C., Comparison of effect of hot water curing, steam curing & normal curing on strength of M-20 grade of concrete, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology, 5(5), 153 -158, 2017.



6. Soroka I., Jaegermann H., Bentur A., Short-term steam-curing and concrete later-age strength, *Matériaux et Construction*, 11 (2), 93-96, 1978.
7. Prem P.R., Bharatkumar B.H., Iyer N., Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete, *Indian Academy of Sciences*, 38 (6), 1421–1431, 2013.
8. Bushlaibi A.H. ve Alshamsi A.M., Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate, *Cement and Concrete Research*, 32 (6), 949–953, 2002.
9. Paulik P., The effect of curing condition (in situ vs. laboratory) on compressive strength development of high strength concrete, *Concrete and Concrete Structures Conference, Procedia Engineering*, 65, 113–119, 2013.
10. Zhang J., Harvey J., Monteiro P.J.M., Ali A., Effect of cement type and curing condition on flexural strength of concrete or pavement slabs, *Concrete for Transportation Infrastructure*, 103-110, 2015.
11. Hussain K., Choktaweekarn P., Saengsoy W., Srichan T., Tangtermsirikul S., Effect of cement types, mineral admixtures, and bottom ash on the curing sensitivity of concrete, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 20 (1), 94-105, 2013.
12. Khatib J.M., Effect of initial curing on absorption and pore size distribution of paste and concrete containing slag, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18 (1), 264-272, 2014.
13. Ho D.W.S., Chua C.W., Tam C.T., Steam-cured concrete incorporating mineral admixtures, *Cement and Concrete Research*, 33 (4), 595–601, 2003.
14. Khatri R.P., Sirivivatnanon V., Yu L.K., Effect of curing on water permeability of concretes prepared with normal Portland cement and with slag and silica fume, *Magazine of Concrete Research*, 49 (180), 167-172, 1997.
15. He Z., Long G., Xie Y., Influence of subsequent curing on water sorptivity and pore structure of steam-cured concrete, *Journal of Central South University*, 19 (4), 1155–1162, 2012.
16. Maslehuddin M., Ibrahim M., Shameem M., Ali M.R., Al-Mehthel M.H., Effect of curing methods on shrinkage and corrosion resistance of concrete, *Construction and Building Materials*, 41: 634–641, 2013.
17. Hootona R.D., Titherington M.P., Chloride resistance of high-performance concretes subjected to accelerated curing, *Cement and Concrete Research* 34 (9), 1561–1567, 2004.
18. Vu M.H., Jean Sulem J., Laudet J.B., Effect of the curing temperature on the creep of a hardened cement paste, *Cement and Concrete Research* 42 (9), 1233–1241, 2012.
19. Ramlochan T., Zacarias, P., Thomas M.D.A., Hooton R.D., The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature Part I: Expansive behaviour, *Cement and Concrete Research*, 33 (6), 807–814, 2003.
20. Jennings H.M., Kumar A., Sant G., Quantitative discrimination of the nano-porestructure of cement paste during drying: new insights from water sorption isotherms, *Cement and Concrete Research*, 76, 27–36, 2015.
21. Grasberger S. ve Meschke G., Thermo-hygro-mechanical degradation of concrete: from coupled 3D material modelling to durability-oriented multifield structural analyses, *Materials and Structures* 37 (4), 244–256, 2004.
22. ASTM C150/C150M-16, Standard Specification for Portland cement. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, 2016.
23. ASTM C1240-15, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
24. ASTM C109 / C109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2016.
25. ASTM D4404-10, Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
26. BS EN 12390-2, Testing hardened concrete. Making and curing specimens for strength tests. Milton Keynes: BSI, 2009.
27. BS EN 12390-8, Testing hardened concrete. Part 8: Depth of penetration of water under pressure. Milton Keynes: BSI, 2009.
28. ASTM C666/C666M-15, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. ASTM International. West Conshohocken, PA, USA, 2015.
29. BS EN 14630, Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method. Milton Keynes: BSI, 2006.
30. Escalante-Garcia J.I. ve Sharp J.H., The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures. *Cement and Concrete Research* 31 (5), 695–702, 2001.
31. Paul M. ve Glasser F.P., Impact of prolonged warm moist cure on Portland cement paste. *Cement and Concrete Research* 30 (12), 1896–1877, 2000.
32. Klieger P., Effect of mixing and curing temperature on concrete strength. *Journal of the American Concrete Institute*, 54 (6), 1063–1081, 1958.
33. Escalante-Garcia J.I., Gomez L.Y., Johal K.K., Mendoza G., Mancha H. ve Mendez J., Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions. *Cement and Concrete Research* 31 (10), 1403–1409, 2001.
34. Luke K. ve Glasser F.P., Internal chemical evolution of the constitution of blended cements. *Cement and Concrete Research* 19 (4), 2495–2502, 1998.

35. Wang Q., Miao M., Feng J., Yan P., The influence of high temperature curing on the hydration characteristics of a cement-GGBS binder, *Advances in Cement Research*, 24 (1), 33–40, 2012.
36. Narmluk M., Nawa T., Effect of fly ash on the kinetics of Portland cement hydration at different curing temperatures *Cement and Concrete Research* 41 (6), 579–589, 2011.
37. Cao Y.J. ve Detwiler R.J., Backscattered electron imaging of cement pastes cured at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 25 (3), 627–638, 1995.
38. Kjellsen K.O., Detwiler R.J. ve Gjørsv O.E., Development of microstructures in plain cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research* 21 (1), 179–189, 1991.
39. Caldarone M.A., Gruber K.A., Burg R.G., High-reactivity metakaolin: a new generation mineral admixture, *Concrete International*, 16 (11), 37– 40, 1994.