

## Görüntü İşleme Yöntemi ile Betonda Oluşan Karbonatlaşmanın Değerlendirilmesi

Tayfun UYGUNOĞLU<sup>1</sup>, Feyza ÇETİNGÜL<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0003-4382-8257>

<sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0002-7750-0850>

\*Sorumlu yazar: feyzacetingul@gmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.07.2023

Kabul tarihi: 17.11.2023

Online Yayınlanma: 11.03.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Görüntü işleme

Karbonatlaşma

pH

Beton

### ÖZ

Binaların dayanıklılığı, yapısal bütünlüğünü koruyarak zamanla çevresel etkilere maruz kalabilmesi ve işlevlerini sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşır. Karbonatlaşma, betonun ömrü boyunca çevresel etkiler sonucu maruz kaldığı karbondioksit gazının etkisiyle oluşan bir reaksiyon sürecidir. Betonun alkali içeriğini düşürerek çelik donatıların koruyucu örtüsüne zarar verir ve çelik donatının paslanmasına neden olabilir. Bu durum yapıların durabilitesini azaltmaktadır. Bu çalışmada, tasarlanan betonların iç kısmının karbonatlaşma potansiyeli ortaya konmuştur. Hazırlanan betonlara laboratuvar ortamında hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi 1, 5 ve 10 günlük periyotlarda uygulanmıştır ve fenol çözeltisi kullanılarak karbonatlaşma derinlikleri tespit edilmiştir. Fenol çözeltisi püskürtülen beton yüzeylerin fotoğrafları alınarak görüntü işleme yöntemi ile karbonatlaşmamış bölgelerin pH değerleri tespit edilmiştir. Karbondioksitli ortama 1, 5 ve 10 gün maruz kalan betonların iç yüzeylerindeki pH değerleri sırası ile 12, 11,5 ve 10,5 olarak tespit edilmiştir.

### Concrete Carbonation Assessment Using Image Processing Technique

#### Research Article

#### Article History:

Received: 24.07.2023

Accepted: 17.11.2023

Published online: 11.03.2024

#### Keywords:

Image processing

Carbonation

pH

Concrete

#### ABSTRACT

The durability of buildings is of great importance in terms of protecting their structural integrity, being exposed to environmental effects over time and maintaining their functions. Carbonation is a reaction process that occurs with the effect of carbon dioxide gas that concrete is exposed to as a result of environmental effects throughout its life. By lowering the alkali content of the concrete, it damages the protective cover of the steel reinforcement and may cause the steel reinforcement to rust. This situation reduces the durability of the structures. In this study, the carbonation potential of the interior of the designed concretes was revealed. In a lab setting, the constructed concretes underwent accelerated carbonation tests at 1, 5, and 10 day intervals. Carbonation depths were calculated using phenol solution. The pH values of the non-carbonated portions of the concrete surfaces were measured using an image processing technique after photographs of the surfaces had been taken and sprayed with phenol solution. The concretes' internal surfaces had pH values of 12, 11.5 and 10.5, respectively, after being exposed to a carbon dioxide environment for 1, 5, and 10 days.

**To Cite:** Uygunoğlu T., Çetingül F. Görüntü İşleme Yöntemi ile Betonda Oluşan Karbonatlaşmanın Değerlendirilmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2024; 7(2): 802-817.

## 1. Giriş

Beton, çimento, su, agrega ve bazen katkı maddelerinin karıştırılmasıyla oluşturulur. Betonda karbonatlaşma olayı ise, beton yapının ömrü boyunca maruz kaldığı çevresel etkiler sonucu karbondioksit gazının beton içerisine nüfuz ederek  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (kalsiyum hidroksit) ile reaksiyona girerek  $\text{CaCO}_3$  (kalsiyum karbonat) oluşturmasıdır. Kalsiyum karbonat, beton içerisindeki boşlukları doldurarak betonun daha yoğun ve sert olmasını sağlar (Yazıcıoğlu ve ark., 2012). Ayrıca, karbonatlaşma süreci betonun yüzeyini sertleştirerek, dış etkilere karşı dayanıklılığını artırır. Ancak, betonda karbonatlaşmanın aşırı boyutlara ulaşması, betonun dayanıklılığı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir. Özellikle beton içerisindeki çelik donatıların koruyucu örtüsüne zarar vererek, çeliğin korozyonuna neden olabilir. Depremlerde yıkılan yapıların büyük çoğunluğunda klorür difüzyonunun ve/veya karbonatlaşmanın neden olduğu korozyon çok fazladır. Bu nedenle, beton yapıların dayanıklılığını arttırmak ve ömrünü uzatmak için karbonatlaşma süreci dikkatle takip edilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

Karbonatlaşma deneyi normal ortamda ve laboratuvar ortamında olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Normal ortamda karbonatlaşma çevre koşullarının yapıya verdiği karbonatlaşma hasarını incelemek için yapılır ve bu deney çok uzun yıllar süreceği için genellikle hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanımı ön plandadır (Mehta, 1986).

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyleri, betona  $\text{CO}_2$  gazı veya karbonatlı su ekleyerek yapılır. Bu, normal atmosferik şartlardan çok daha yüksek  $\text{CO}_2$  konsantrasyonu sağlar ve böylece karbonatlaşma süreci hızlandırılır (Demir ve ark., 2019). Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyleri, beton kalitesinin ve dayanıklılığının belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu deneyler sayesinde, betonun karbonatlaşmaya karşı ne kadar dirençli olduğu ve ne kadar sürede hasar göreceği ölçülebilir (Li ve Wu, 2022). Böylece, betonun ömrünü tahmin etmek ve yapısal hasarları önlemek için uygun önlemler alınabilir.

Karbonatlaşma, genellikle betonun yüzeyinde başlar ve zamanla betonun içine nüfuz eder. Karbonatlaşmanın hızı, betonun yoğunluğuna, çimento-kum oranına, su-çimento oranına ve çevresel koşullara bağlıdır. Yüksek yoğunluğa sahip betonlar, karbondioksit gazının nüfuz etmesini engelleyerek karbonatlaşmayı yavaşlatırken, düşük yoğunluğa sahip betonlar daha çabuk karbonatlaşır. Ayrıca, yüksek su-çimento oranına sahip betonlar daha kolay karbonatlaşırken, düşük su-çimento oranına sahip betonlar daha dayanıklıdır.

Konuyla ilgili olarak literatürde, You ve ark. (2022) çimento bazlı malzemelerin karbonatlaşması için yapılan deneysel ve sayısal modelleme çalışmalarının bir incelemesidir. Makalede, karbonatlaşma sürecinin mekanizması ve etkileri, karbonatlaşma hızı, karbonatlaşma derinliği ve çimento bazlı malzemelerin özellikleri gibi önemli konular ele alınmıştır. Ayrıca, çimento bazlı malzemelerin karbonatlaşması için kullanılan deneysel yöntemler ve sayısal modelleme tekniklerini de tartışmışlardır. Makalede, karbonatlaşma sürecinin anlaşılması için gerekli olan bilgiyi sunarlarken, çimento bazlı malzemelerin karbonatlaşmasıyla ilgili gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmayı amaçlamışlardır.

Giulietti ve ark. (2021) otomatik ölçüm sistemlerinin kullanılarak betondaki karbonatlaşma derinliğinin tespit edilmesi konusunu ele almışlardır. Makalede, fenol çözültisi ile kaplanmış beton yüzeylerine uygulanan görüntü işleme teknikleriyle karbonatlaşma derinliğinin tespit edilmesi için bir otomatik ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem, karbonatlaşma derinliğini belirlemek için geleneksel yöntemlerden daha hızlı ve daha doğru sonuçlar vermektedir. Ayrıca, otomatik ölçüm sistemleri sayesinde karbonatlaşma derinliği ölçümlerinin insan hatasından kaynaklanan yanlışlıkların minimize edildiği de vurgulanmaktadır. Makale, beton yapıların karbonatlaşması sürecindeki izleme ve bakım çalışmaları için bu tür otomatik ölçüm sistemlerinin önemini vurgulamışlardır.

Choi ve ark. (2017) beton yüzeylerindeki karbonatlaşma bölgelerinin tespiti için görüntü işleme teknikleri kullanımını ele almaktadırlar. Çalışmada, fenol solüsyonu ile kaplanmış beton yüzeylerindeki karbonatlaşma bölgelerinin tespiti için bir görüntü işleme teknikleri sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem, dijital fotoğrafların işlenmesiyle karbonatlaşma bölgelerini tespit eder ve bu bölgelerin hacimleri hesaplar. Sonuçlar, karbonatlaşmanın derinliği ve etkilenen alanların belirlenmesi için önemli bir bilgi kaynağıdır. Makale, beton yapıların karbonatlaşmasının izlenmesi ve bakım çalışmaları için bu tür görüntü işleme tekniklerinin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Malami ve ark. (2021) betondaki karbonatlaşma derinliğinin tahmin edilmesi için bir yapay zeka yöntemi olan hibrid nöro-bulanık ve öz-düzenleyici tahmin modelinin uygulanması konusunu ele almaktadırlar. Çalışmada, bir dizi özellik ve karbonatlaşma derinliği verileri kullanılarak öğrenen bir model geliştirilmişlerdir. Bu model, hibrid nöro-bulanık ve öz-düzenleyici tahmin modelinin avantajlarını birleştirerek daha yüksek doğruluk ve performans sağlamaktadırlar. Sonuçlar, bu tür yapay zeka yöntemlerinin beton yapıların karbonatlaşması sürecindeki izleme ve bakım çalışmaları için önemli bir araç olduğunu göstermektedir. Makale, beton yapıların ömrünü uzatmak için yapay zeka yöntemlerinin kullanımının önemini vurgulamaktadır.

Paul ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, betondaki karbonatlaşma derinliğinin değerlendirilmesi ve tahmin edilmesi için bir ampirik model tasarımı konusunu ele almışlardır. Çalışmada, beton numunelerindeki karbonatlaşma derinliği ölçümleri ve bir dizi özellik (örneğin beton yoğunluğu, çimento oranı) kullanılarak bir ampirik model oluşturulmuşlardır. Bu model, karbonatlaşma derinliğini doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar, bu ampirik modelin beton yapıların karbonatlaşma sürecindeki izleme ve bakım çalışmaları için uygun bir araç olduğunu göstermektedir. Makale, beton yapıların ömrünü uzatmak için uygun araçların geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Mi ve ark. (2020) yazdıkları makalede, betonarme kirişlerde karbonatlaşma hizmet ömrünün tahmin edilmesi konusunda odaklanmışlardır. Çalışmada, karbonatlaşma derinliği ölçümleri yapmış ve bu veriler kullanarak bir karbonatlaşma bölgesi dağılımı modeli geliştirmişlerdir. Daha sonra, bu model, tahribatsız test teknikleriyle elde edilen beton özellikleri verileriyle birleştirilerek, betonarme kirişlerin karbonatlaşma hizmet ömrünün tahmininde kullanmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda, bu modelin betonarme kirişlerin karbonatlaşma hizmet ömrünü doğru bir şekilde tahmin ettiği gösterilmiştir. Bu

makale, karbonatlaşma derinliğinin betonarme yapıların dayanıklılığına olan etkisini belirlemek için bir araç olarak karbonatlaşma derinliği ölçümlerinin önemini vurgulamaktadır.

Liu ve ark. (2022) yüksek fırın cürufu içeren betonların karbonatlaşmasının sürdürülen basınç yükü tarafından nasıl etkilendiği incelemişlerdir. Araştırmacılar, beton örneklerine belirli bir düzeyde basınç yükü uygulayarak ve daha sonra bu örneklerin karbonatlaşma oranlarını ölçerek çalışmalarını gerçekleştirdiler. Sonuçlar, basınç yükü altındaki betonların karbonatlaşma oranlarının kontrol örneklerine göre daha yüksek olduğunu göstermiştir. Yapılan çalışma, beton yapının uzun vadeli davranışı hakkında daha iyi bilgi sağlamak için önemli bir adım olarak kabul edilir.

Literatürdeki çalışmalarda beton içerisine karbondioksit girmesi sonucu inşaat demirini korozyon açısından risk oluşturan karbonatlaşma derinliği dikkate alınmıştır. Ayrıca karbonatlaşma olmayan bölgeleri gösteren fenol çözeltisinin rengi de ortamın pH'ını gösterebilmektedir. Diğer yandan katı cisimlerin pH değerlerinin belirlenmesi oldukça zor olup bir ön işlem ile toz hale geldikten sonra çözelti kullanılarak belirlenebilmektedir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada sertleşmiş beton yüzeyine uygulanan fenol çözeltisinden farklı renk tonları alınarak görüntü işleme yöntemi ile pH değerleri tespit edilmiştir. Böylece betonun iç kısmının karbonatlaşma potansiyeli belirlenebilecek ve betonlarda donatı etrafındaki pH seviyesine bağlı olarak korozyon oluşma riski ortaya konabilecektir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

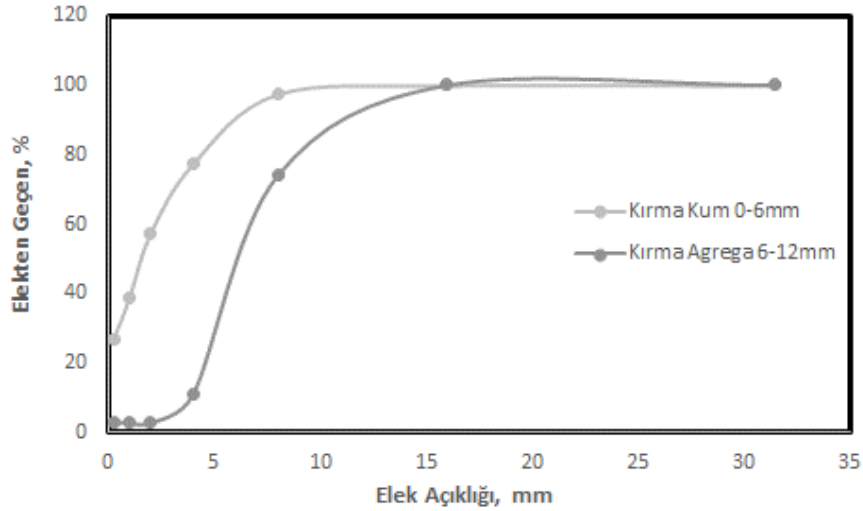
Deneyde kullanılan çimento, Afyon Çimento Sanayi Fabrikasının üretimi olan standart CEM I 42,5 R Portland çimentosu olup özgül ağırlığı 3.11'dir (TS EN 197-1, 2012). Kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal özellikleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Betonların üretiminde 0/6 mm ve 6/12 mm olmak üzere iki farklı agrega boyutu kullanılmıştır. Beton karışımında Afyonkarahisar şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 1. Kullanılan CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal içeriği

Kimyasal Analiz	Analiz Sonuçları (%)
SiO <sub>2</sub>	20,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,05
CaO	62,08
MgO	2,55
SO <sub>3</sub>	2,57
Kızdırma Kaybı	1,55

## 2.2. Betonların Hazırlanması

Deneyde kullanılacak olan betonların hazırlanmasında kullanılacak agreganın granülometrisi yapılan elek analizi sonrasında elde edilmiş ve Şekil 1’de verilmiştir. Granülometri eğrisi esas alınarak 0/6 mm ve 6/12 mm miktarları %50’şer oranında alınarak harmanlanmıştır.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan agregaların granülometri eğrisi

Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak  $300 \text{ kg/m}^3$  çimento kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan betonlar 0,6 su/çimento oranına sahip tek bir karışım dizaynı olarak üretilmiştir (Tablo 2). Karışımların işlenebilirlik ölçütü olarak hazır beton için genel kullanıma uygun olan 20 cm çökme değeri hedeflenmiştir.

Tablo 2. Üretilen betonların birim hacimdeki bileşen miktarları

Bileşenler	Miktar ( $\text{kg/m}^3$ )
Çimento	300
Kırma Kum (0-6mm)	895
Kırma Agreg (6-12mm)	908
Su	180
Katkı	12

Malzemeler mikser kullanılarak karıştırılmış ve üretilen taze betonlarda çökme testi yapılmıştır. Çökme testinden sonra betonlar 3 adet  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}$  ve 6 adet  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  boyutlarında olacak şekilde üretilmiştir. Vibrasyon makinesinde betonların kalıplara yerleştirilmesi sağlanmıştır ve 1 gün laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Bir gün sonra numuneler kalıplarından çıkartılıp kür işlemini gerçekleştirmek için içerisinde  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta su bulunan havuzda 28 gün boyunca standart kür işlemine tabi tutulmuşlardır.

### 2.3. Basınç Deneyi

Kür zamanlarını (28 gün) tamamlayan numuneler üzerinde deneyler uygulanmaya başlanmıştır. Basınç dayanımı testi TS EN 12390-3 (2019) standardına uygun şekilde 200 ton kapasiteye sahip otomatik basınç presinde gerçekleştirilmiştir. Bu deney için 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. Basınç deneyinde elde edilen kırılma yükü numunenin yüzey alanına bölünerek MPa cinsinden basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Betonlara karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrasında basınç deneyi uygulanmıştır.

### 2.4. Yüzey Sertliği (Schmidt) Deneyi

Schmidt çekici ile beton yüzey sertliği ölçümleri TS EN 13791 (2019) standardına uygun bir şekilde yapılmıştır. Deneyde L tipi Schmidt çekici kullanılmıştır (Şekil 2). Deney 28 günlük kür sürelerini tamamlamış 150x150x150 mm küp numuneler üzerinde beton basınç presinde 7 MPa sabit yük altında yapılmıştır. Numuneler üzerinde en az 20 mm mesafeyle 12 vuruş yapılmıştır, daha sonra en yüksek ve en düşük olan değerler çıkartılarak geri kalan 10 değer aritmetik ortalaması alınmıştır ve buna bağlı olarak yüzey sertliği değerleri elde edilmiştir. Yüzey sertliği deneyi karbonatlaşma öncesi ve sonrası numunelerde uygulanmıştır.



Şekil 2. Schmidt çekici deneyi uygulaması

### 2.5. Karbonatlaşma Deneyi

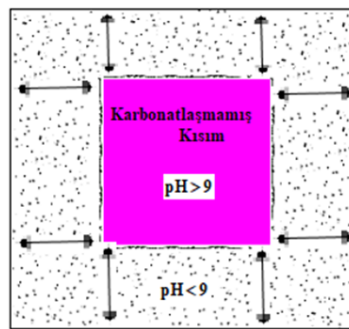
Kür işlemi tamamlanan beton numuneler üzerinde Şekil 3'de gösterildiği gibi karbonatlaşma için geliştirilmiş sızdırmaz kap içerisinde hızlandırılmış karbonatlaşma testi gerçekleştirilmiştir. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi ISO 1920-12 (2015) standardına uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Karbonatlaşma testi sırasında sabit bağıl nem değeri %55 olarak dikkate alınmıştır. Kapalı kap içerisindeki nem değerinin %55 oranında kalabilmesi için doymuş halde sodyum di-kromat çözeltisi hazırlanmış ve karbonatlaşma kabının tabanına yerleştirilmiştir. Karbonatlaşma deneyine tabi tutulacak beton numuneleri test kabının içine yerleştirilerek kabın kapağı sızdırmaz bir şekilde sıkıca kapatılmıştır. Karbonatlaşma kabı içindeki CO<sub>2</sub> miktarı %1 olarak ayarlanmıştır. CO<sub>2</sub> tüpü üzerindeki ve eş zamanlı olarak karbonatlaşma kabı üzerindeki basınç göstergesinden okuma yapılarak CO<sub>2</sub> gazı

kontrollü bir şekilde verilmiştir. Karbonatlaşma düzeneğinde bulunan tek yönlü valf aracılığı ile CO<sub>2</sub> dolu tüpten tankın içerisine basınç 0,4 bar olana kadar CO<sub>2</sub> verilmiştir. Düzenekteki CO<sub>2</sub> miktarı kap dışarısında bulunan barometre ile ölçülmektedir. Deneyde, numuneler 1, 5 ve 10 günlük periyotlarda 0,4 bar CO<sub>2</sub>'e maruz bırakılmıştır.



Şekil 3. Hızlı karbonatlaşma test düzeneği

Boyutu 100 mm olan küplerin her bir test gününde, betonlardaki karbonatlaşma derinliğinin belirlenebilmesi amacıyla numuneler yarma deneyine tabi tutulmuşlardır. Betonların iç yüzeylerine RILEM CPC18 (1988) tarafından önerilen fenolftalein püskürtülmesi yöntemiyle karbonatlaşma derinlikleri belirlenmiştir (Şekil 4). Fenolftalein çözeltisi toz ve parçacıklardan arındırılmış beton yüzeyine püskürtülür. Fenolftalein, pH 9 değerinin üstüne çıktığında, yani beton alkali olduğunda pembe renge dönüşen bir asit göstergesidir. Renklenme olmazsa, karbonatlaşma meydana gelir ve karbonatlı yüzey tabakasının derinliği ölçülebilir. Karbonatlaşma derinliği olarak verilen değerler, yarılmış beton küpün yüzeyinde alınan sekiz ölçümün ortalama değeridir.



Şekil 4. Betonun kırılan yüzeyinde karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi

## 2.6. Betonda karbonatlaşmayan bölgelerin RGB değerleri ile pH analizi

Hazırlanan betonlar karbonatlaşma testine tabi tutulduktan sonra yarma yapılarak düzgün yüzeyler elde edilmiştir. Daha sonra kırılan yüzeyler temizlenmiş ve fenol çözeltisi püskürtülmüştür. Renk değiştiren bölgeler fotoğflanarak görüntü işleme yöntemi ile RGB (kırmızı, yeşil, mavi) renk analizi yapılmıştır.

Bu kısımda hazırlanmış olan çalıştırılabilir komut dosyası ile analiz etmek istediğimiz beton numunelerin fotoğrafları görüntü işleme yöntemlerini kullanarak istenilen alanın pH değeri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada aşağıdaki teknoloji ve kütüphaneler kullanılarak uygulama yapılmaktadır.

- Python Programlama Dili
- OpenCV Kütüphanesi
- Numpy Kütüphanesi

Komut dosyasında kullanılan fonksiyonlar ve komutlar aşağıda açıklanmıştır.

```
img = cv2.imread('fotograf.jpg')
cv2.imshow('Fotoğraf', img)
```

Bu komutlar ile istenilen fotoğraf yüklenir ve fotoğraf gösterilir. Böylece kullanıcının numuneden bir alan seçmesi için ortam hazırlanmış olur. Daha sonra "mouse\_callback" fonksiyonu ile mouse hareketleri takip edilir ve seçilen alanlar için pH değeri hesaplanır.

Fonksiyonun bu kısmında fotoğrafın pH değerinin hesaplanması istenilen alan seçilir.

Bu kısımda ise seçili alanın Red, Blue ve Green piksel değerleri ayıklanarak ortalama değerleri hesaplanır.

Bu "if-else" bloğunda ise daha önceden referans alınan fenolftalein pH cetvelinin renklerinin RGB değerlerini hesaplayarak, pH değerleri ile eşleştirme yapılmaktadır. Böylece seçilen alan gösterilmekte ve alanın pH değeri hangi aralıkta ise o aralığa ait pH değeri konsola çıktı olarak ortalama RGB değerleri ile birlikte yazdırılmaktadır.

```
b, g, r = cv2.split(roi)
print('Red ortalama: ', r.mean())
print('Green ortalama: ', g.mean())
print('Blue ortalama: ', b.mean())
```

```
if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
    drawing = True
    rect = [x, y, 0, 0]
elif event == cv2.EVENT_MOUSEMOVE:
    if drawing == True:
        rect[2] = x - rect[0]
        rect[3] = y - rect[1]
elif event == cv2.EVENT_LBUTTONUP:
    drawing = False
    if rect[2] < 0:
        rect[0] += rect[2]
        rect[2] = abs(rect[2])
    if rect[3] < 0:
        rect[1] += rect[3]
        rect[3] = abs(rect[3])
    # Bölgeyi seç
    roi = img[rect[1]:rect[1]+rect[3], rect[0]:rect[0]+rect[2]]
```



Komut dosyasının tamamı aşağıdaki verilmektedir. Verilmiş olan bu komut dosyası farklı görüntü işleme yöntemleri ve hesaplamalar ile geliştirilmeye açıktır. Böylece doğruluk oranı daha yüksek sonuçlar elde edilebilir.

```
import cv2

# Fotoğrafı yükle
img = cv2.imread('fotograf.jpg')
# Fotoğrafı göster
cv2.imshow('Fotoğraf', img)
# Bölgeyi seçmek için fare olayları işleyicisi oluştur
rect = None
drawing = False

def mouse_callback(event, x, y, flags, params):
    global rect, drawing
    if event == cv2.EVENT_LBUTTONDOWN:
        drawing = True
        rect = [x, y, 0, 0]
    elif event == cv2.EVENT_MOUSEMOVE:
        if drawing == True:
            rect[2] = x - rect[0]
            rect[3] = y - rect[1]
    elif event == cv2.EVENT_LBUTTONUP:
        drawing = False
        if rect[2] < 0:
            rect[0] += rect[2]
            rect[2] = abs(rect[2])
        if rect[3] < 0:
            rect[1] += rect[3]
            rect[3] = abs(rect[3])

        # Bölgeyi seç
        roi = img[rect[1]:rect[1]+rect[3], rect[0]:rect[0]+rect[2]]
        # Her pikselin RGB değerlerini al
        b, g, r = cv2.split(roi)
        print('Red ortalama: ', r.mean())
        print('Green ortalama: ', g.mean())
        print('Blue ortalama: ', b.mean())

        if r.mean() <= 166 and g.mean() <= 30 and b.mean() <= 77:
            print("pH = 12")
        elif r.mean() <= 194 and g.mean() <= 40 and b.mean() <= 92:
            print("pH = 11,5")
        elif r.mean() <= 214 and g.mean() <= 51 and b.mean() <= 108:
            print("pH = 11")
        elif r.mean() <= 230 and g.mean() <= 73 and b.mean() <= 128:
            print("pH = 10,5")
        elif r.mean() <= 240 and g.mean() <= 101 and b.mean() <= 149:
            print("pH = 10")
        elif r.mean() <= 247 and g.mean() <= 131 and b.mean() <= 172:
            print("pH = 9,5")
        elif r.mean() <= 250 and g.mean() <= 162 and b.mean() <= 193:
            print("pH = 9")
        else:
            print("Beton Karbonatlaşmıştır")

        # Seçilen bölgeyi göster
        cv2.imshow('Seçili Bölge', roi)

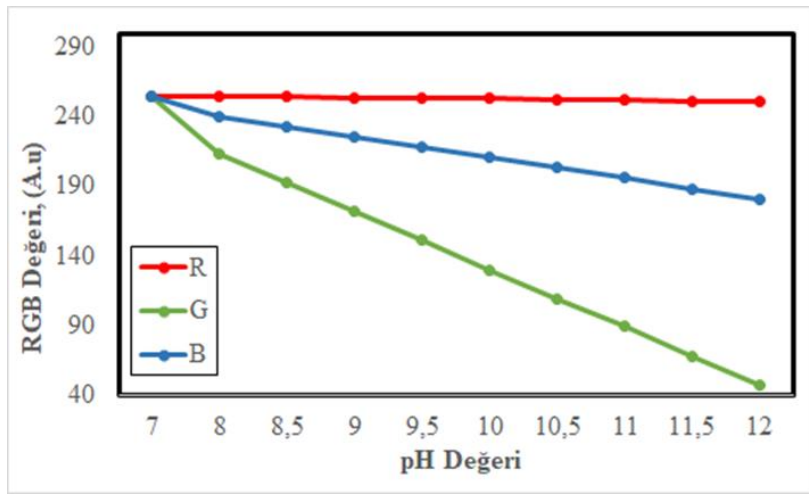
# Fare olayları işleyicisini bağla
cv2.namedWindow('Fotoğraf')
cv2.setMouseCallback('Fotoğraf', mouse_callback)

# Ekranda gösterilen pencereyi kapatmak için bekleyin
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()
```

Bu kısımda özetle görüntü işleme yöntemi ile pH analizi için fenol çözeltisinin Tablo 3’de verilen renk tonlarının RGB değerlerini (Şekil 5) referans olarak beton yüzeylerindeki renkler üzerinden aldığı RGB değerleri ile kıyaslamaktadır. Analiz sonucunda betonların yüzey renkleri ile fenol çözelti rengini kodlar eşleştirmiş ve pH aralıkları belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Fenol çözeltisinin rengine bağlı olarak pH seviyesinin değişimi (Martins ve ark., 2018)

pH	7	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12
Phenolphthalein										



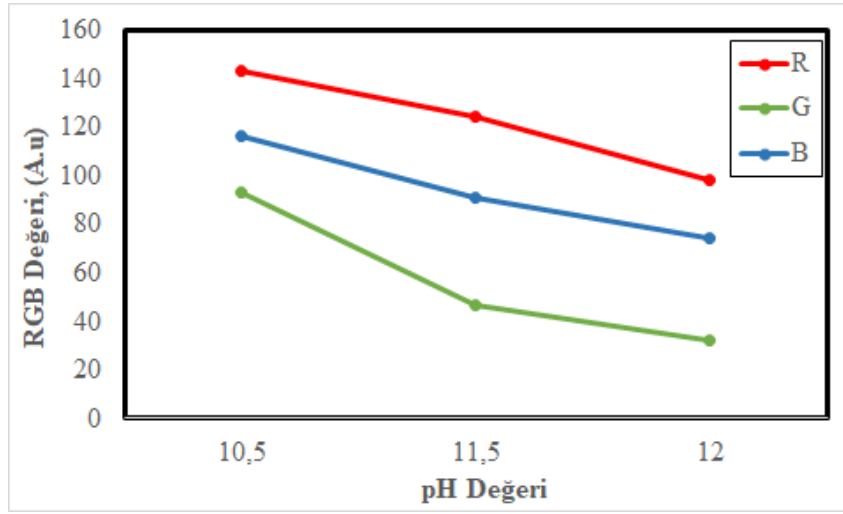
**Şekil 5.** Fenol çözeltisinin farklı pH aralıklarındaki renk değişimine göre RGB değerleri

### 3. Bulgular ve Tartışma

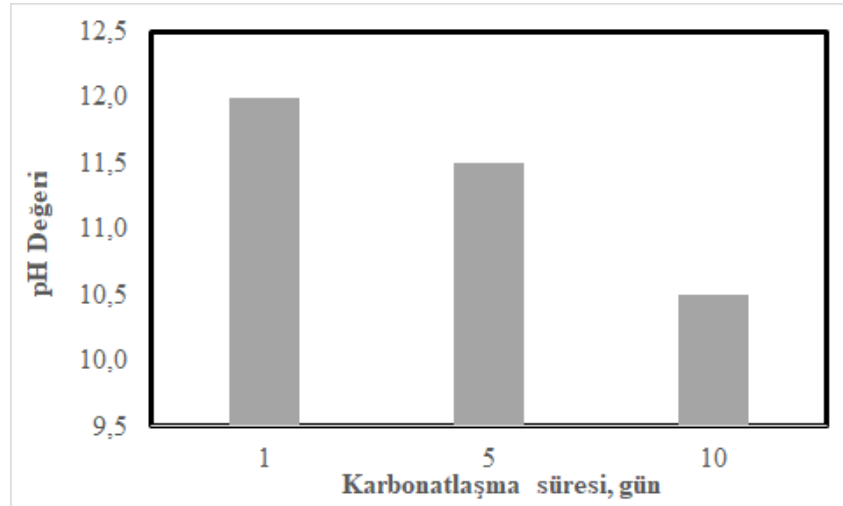
Üretilen betonların hızlandırılmış karbonatlaşmaya maruz bırakılmaları sonrasında beton numuneler yarılarak iç kısımlarına püskürtülen fenol çözeltisi ile CO<sub>2</sub> bulunan bölgeler reaksiyona girmiş ve pembe renk haline dönüşmüştür. Bu testte, beton yüzeyine fenolftalein solüsyonu uygulanır. Fenolftalein, karbonatlaşmamış betonda alkali ortamda renksizken, karbonatlaşmış bölgelerde pembe-mor renk değişikliği gösterir. Bu sayede, beton yüzeyine uygulanan fenolftalein reaktifinin renk değişikliği ile karbonatlaşma derinliği tespit edilebilmektedir (Anstice ve ark., 2005). Karbonatlaşma tankında 1, 5 ve 10 günlük zamanlarda bekletilen beton numunelerde oluşan renk değişimi sırası ile koyudan açık renge doğru olduğu gözlemlenmiştir. Karbonatlaşma sonucu oluşan kalsiyum karbonat iyonları pH'ı azaltır (Lin, 2007). Fenol çözeltisi püskürtüldüğünde pH'ın düşük olduğu alanlarda açık pembe renk tonları gözlemlenmiştir.

Beton yüzeylerden alınan fotoğraflar görüntü işleme yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda elde edilen RGB değerleri Şekil 6’da verilmiştir. Fenol çözeltisinin verdiği renk tonuna göre 1, 5 ve 10 gün karbonatlaşma tankında bekletilen numunelerin karbonatlaşmamış yüzey pH değeri görüntü işleme yöntemi kullanılarak sırası ile 12, 11,5 ve 10,5 olarak tespit edilmiştir (Şekil 7, Şekil 8).

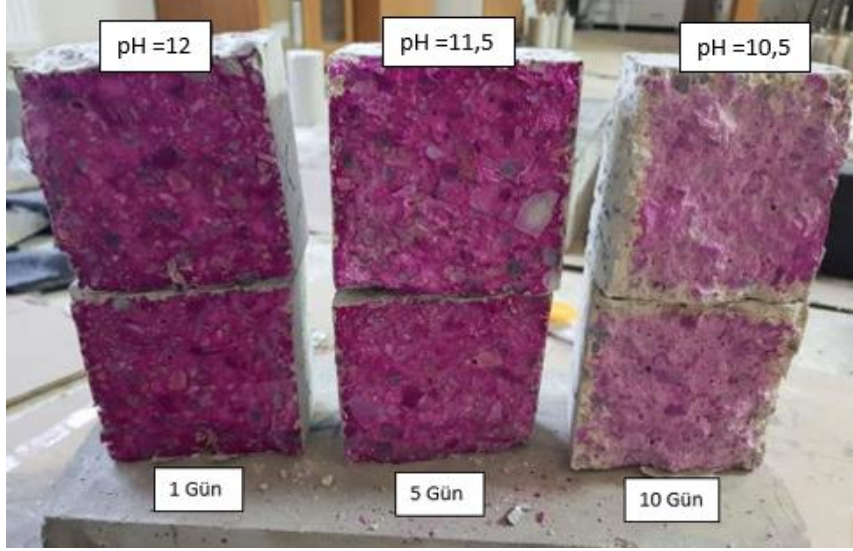
Ayrıca beton yüzeylerindeki fenol çözeltisinin renk tonlarının farklı olduğu da Şekil 7’de açıkça görülmektedir. Bu renk tonlarının farklı olması pH’ın da değiştiğinin göstergesidir (Lin, 2007). Karbonatlaşmaya maruz kalma süresi arttıkça CO<sub>2</sub>’in beton içerisine daha fazla nüfuz edeceğinden dolayı hem yüzeye yakın bölgelerdeki serbest kireci bağlayarak karbonatlaşma derinliğinin artmasına neden olmuş hem de daha iç bölgelerin de pH değerinin azalmasına neden olduğu görülmektedir. Havadaki CO<sub>2</sub> gazının beton içerisine nüfuz etmesi ve beton içinde bulunan serbest CaO veya Ca(OH)<sub>2</sub> ile reaksiyona girerek CaCO<sub>3</sub> formuna dönüşmesi sonucunda ortamın pH değerini azaltmaya başlamıştır (Neville, 1995; Ogha ve Nagataki, 1989). Beton içerisinde donatı bulunması durumunda donatı etrafına da fenol çözeltisi püskürtülerek, betonun donatı çevresindeki pH seviyesi hızlı ve güvenilir bir şekilde belirlenebilecek ve böylece korozyon risk değerlendirilmesi de yapılabilecektir.



Şekil 6. Beton numunelerin yüzeyinden alınan RGB değerlerine göre pH analizi

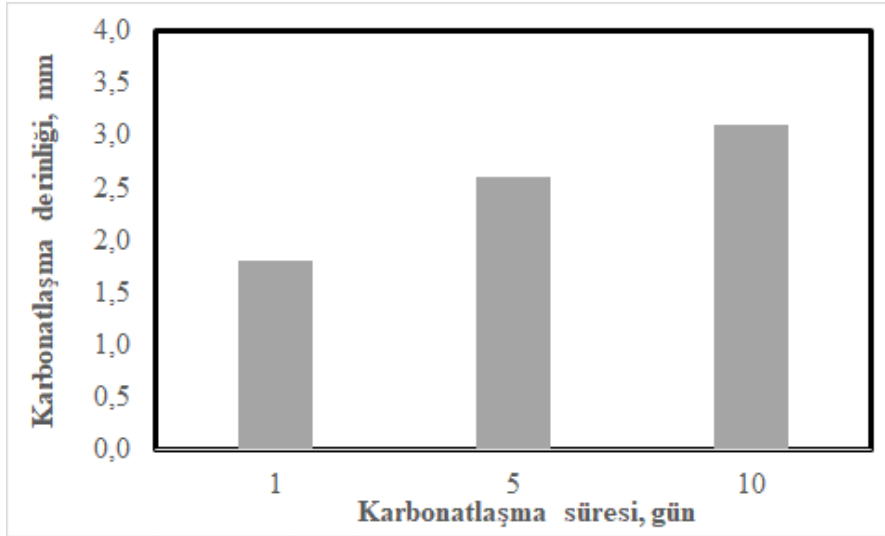


Şekil 7. Karbonatlaşma süresine bağlı olarak belirlenen pH değerleri



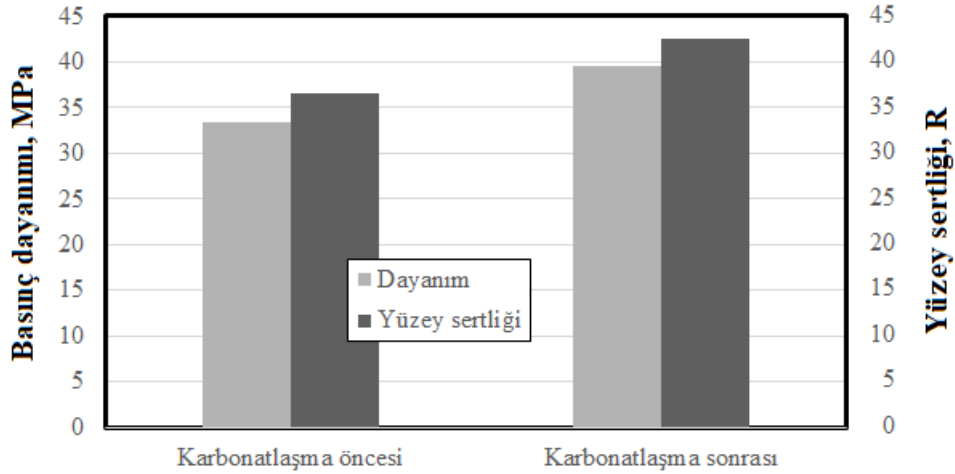
Şekil 8. Beton numunelerinde karbonatlaşma olmayan bölgelerdeki pH değerleri

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi sonrası üretilen betonların içerisinde oluşan karbonatlaşma derinliği ortalama olarak ölçüldüğünde, 1 gün sonunda 1.9 mm iken 5 gün ve 10 gün sonunda artarak devam etmiş ve sırasıyla 2.6 ve 3.1 mm derinliğe kadar ilerlemiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Zamana bağlı karbonatlaşma derinliği

Betonlardaki karbonatlaşma betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir (Chang ve Chen 2006). Betonlardaki karbonatlaşma etkisiyle birlikte kirecin karbonatlaşarak beton yüzey boşluklarını doldurması sonucunda betonların basınç dayanımında artış görülmüştür. Beton numunelerinde karbonatlaşma sonrası basınç dayanımında %18 oranında artış gözlemlenmiştir (Şekil 10). Karbonatlaşmayla beton dayanımında artış olduğu Lin (2007) tarafından da deneysel olarak gözlemlenmiştir.



**Şekil 10.** Betonların karbonatlaşma öncesi ve sonrası basınç dayanımlar

Karbonatlaşma öncesi ve sonrası basınç dayanımları değışimleri bakımından incelendiğinde, az da olsa bazı serilerin karbonatlaşma sonrası dayanımlarının arttığı görülmektedir. Betonda karbonatlaşma reaksiyonunun ürünü olan  $\text{CaCO}_3$  'ün ortaya çıkmasıyla karbonatlaşan kısımlarda yoğunluk artışı gerçekleşmiş ve yüzeydeki bu yoğunluk artışı dayanımda az da olsa artış ile kendini hissettirmiştir. Betonda karbonatlaşma ile gözeneklerin kapanması ve dayanımın bir miktar artması olumlu bir durumdur. Ancak bu durum betonda inşaat demiri bulunması durumunda bir dezavantaj haline dönüşmektedir. Çünkü betondaki karbonatlaşma sonucunda donatı etrafındaki pasivasyon tabakası ortadan kalkarak inşaat demirinin korozyon sürecinin başlamasına neden olmaktadır (Chang ve ark., 2004). Betonun karbonatlaşmasıyla gözeneklerin dolması sonucunda yüzey sertliği de artmaktadır. Betonlarda karbonatlaşma öncesi ve sonrasında Schmidt çekiciyle belirlenen yüzey sertlik değerlerinde, karbonatlaşma sonrasında %16 oranında bir artış görülmüştür. Bu artış basınç dayanımının da artmasında etkili olmuştur. Bu durum literatür ile de uyumludur. Çünkü Erdoğan (2003), karbonatlaşma olayı sonucunda serbest kalan suyun, çimentonun hidratasyonuna yardımcı olarak dayanımda bir miktar artış meydana getirebileceğini belirtmiştir. Bu artış özellikle mevcut yapıların yüzey sertliği ile tahmini sırasında daha yüksek sonuçlar alınmasına neden olmaktadır. Literatüre bakıldığı zaman Gülan (2015) hazırladığı tez çalışmasında karbonatlaşmadan kaynaklı betonların yüzey sertliklerinde artış gözlemlemiştir. Kim ve ark. (2009) betonda karbonatlaşma nedeni ile görülen yüzey sertliği artışının mevcut yapıların değerlendirilmesinde hatalara neden olmaması için bu tip değerlendirmelerde kullanılmak üzere yeni bir bağıntı önermiştir.

#### 4. Sonuç

Bu çalışmada, betonda karbonatlaşma derinliği yanı sıra karbonatlaşma olmayan bölgelerin fenol çözeltisi rengine bağlı olarak pH değerinin değişimini görüntü işleme yöntemiyle ortaya konması amaçlanmış ve aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Betonlara karbonatlaşma tankında 1, 5 ve 10 gün CO<sub>2</sub> konsantrasyonu yüksek olan ortama maruz bırakılmıştır. Bu süreler sonunda karbonatlaşma derinlikleri giderek artmıştır.
- Literatürde verilen fenol çözeltisinin pH değerine bağlı farklı renk tonlarına ait RGB değerleri görüntü işleme yöntemi ile elde edilmiştir.
- Beton yüzeylerdeki fenol çözeltisinin renk tonları da görüntü işleme yöntemi ile analiz edilerek RGB değerleri bulunmuştur. Buna bağlı olarak beton iç yüzeyindeki pH değerleri belirlenmiştir.
- Beton iç yüzeyinden elde edilen fenol çözeltisi RGB değerlerine göre CO<sub>2</sub>'e maruz kalma süresi arttıkça betonun pH değeri azalmıştır.
- Beton numunelerde karbonatlaşma sonrası basınç değerleri %18 oranında artarken, yüzey sertlik değerleri de %16 oranında artmıştır.

Sonuç olarak, görüntü işleme yöntemi kullanılarak betonda karbonatlaşma derinliği yanı sıra pH göstergesi olan fenol çözeltisinin renk tonundan yola çıkılarak betonun iç bölgelerindeki pH değerleri de herhangi bir ön işlem gerektirmeden (kırma-öğütme, çözelti hazırlama vb.) sertleşmiş haldeyken belirlenebilmektedir. Özellikle inşaat demiri içeren betonlarda karbonatlaşma yanı sıra donatı çevresindeki pH değerinin fenol çözelti renk tonuna göre belirlenmesiyle korozyon riski de ortaya konulabilecektir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

#### Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye benzer oranda katkı sağlamış olduğunu beyan ederler.

#### Kaynakça

- Anstice DJ., Page CL., Page MM. The pore solution phase of carbonated cement paste. Cement and Concrete Research 2005; 35: 377-383.
- Chang CF., Chen JW. The experimental investigation of concrete carbonation depth. Cement and Concrete Research 2006; 36(9): 1760-1767.
- Chang JJ., Yeih W., Huang R., Chen CT. Stability of several current used concrete durability indices on evaluating the corrosion hazard for carbonated concrete. Materials Chemistry and Physics 2004; 84: 71-78.

- Choi J., Lee Y., Kim YY., Lee BY. Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution. *Construction and Building Materials* 2017; 154: 451-461.
- Demir Şahin D., Çullu M., Eker H. Betonların aşındırma ve karbonatlaşma performanslarına kireçsi uçucu küllerin farklı incelik ve ikame oranlarının etkisi. *European Journal of Science and Technology* 2019; 17: 1150-1163.
- Erdoğan TY., Beton. ODTÜ Yayıncılık, 135s, 2003 Ankara.
- Giulietti N., Chiariotti P., Cosoli G., Mobili A., Pandarese G., Tittarelli F., Revel GM. Automated measurement system for detecting carbonation depth: Image-processing based technique applied to concrete sprayed with phenolphthalein. *Measurement* 2021; 175: 1-8.
- Gülan L. Atık mermer tozu ve cam elyaf katkısının betondaki karbonatlaşmaya etkisi (Yüksek Lisans Tezi). 2015 Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- ISO 1920-12. Testing of concrete, Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete, International Standard, 2015 Switzerland.
- Kim JK., Kim CY., Yi ST., Lee Y. Effect of carbonation on the rebound number and compressive strength of concrete. *Cement and Concrete Composites* 2009; 31(2): 139-144.
- Li L., Wu M. An overview of utilizing CO<sub>2</sub> for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 2022; 60: 1-17.
- Lin X. Effect of early age carbonation on strength and PH of concrete. McGill University Department of Civil Engineering. Master Thesis 2007; 132 pages.
- Liu Z., Heede PV., Zhang C., Shi X., Wang L., Li J., Yao Y., Belie ND. Influence of sustained compressive load on the carbonation of concrete containing blast furnace slag. *Construction and Building Materials* 2022; 335: 1-12.
- Malami SI., Anwar FH., Abdulrahman S., Haruna SI., Ali SIA., Abba SI. Implementation of hybrid neuro-fuzzy and self-turning predictive model for the prediction of concrete carbonation depth: A soft computing technique. *Results in Engineering* 2021; 10: 1-14.
- Martins ROG., Alvarenga RCSSA., Pedroti LG., Oliveira AF., Mendes BC., Azevedo ARG. Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test. *Construction and Building Materials* 2018; 159: 261–268.
- Mehta PK. *Concrete: Structure, properties, and materials*. Prentice-Hall, Englewood 1986; NJ.
- Mi R., Pan G., Liew KM. Predicting carbonation service life of reinforced concrete beams reflecting distribution of carbonation zones. *Construction and Building Materials* 2020; 255: 1-7.
- Neville AM., *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman Group 1995; UK.
- Ogħa H., Nagataki S. Prediction of carbonation depth of concrete with fly ash. *Proceedings of the Third International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. Trodheim, Norway 1989; 114: 275-294.

- Paul SC., Panda B., Huang Y., Garg A., Peng X. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete, *Measurement* 2018; 124: 205-210.
- TS EN 12390-3. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. 2019; Ankara.
- TS EN 12504-2. Yapılarda beton deneyleri-Bölüm 2: Tahribatsız muayene - Geri sıçrama sayısının belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü. 2021; Ankara.
- TS EN 13791. Standardı Kapsamında Beton Basınç Dayanımının Yerinde Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. 2019; Ankara.
- TS EN 197-1. Cement- Stage1: General Cements – Component. Türk Standartları Enstitüsü. 2012; Ankara.
- Yazıcıoğlu S., Demirel B., Gönen T., Özer Ş. Farklı tip çimentoların betonun karbonatlaşmasına etkisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi* 2012; 4(3): 112-120.
- You X., Hu X., He P., Liu J., Shi C. A review on the modelling of carbonation of hardened and fresh cement-based materials, *Cement and Concrete Composites* 2022; 125.