

AKÜ FEMÜBİD 22 (2022) 065602 (1400-1412)

AKU J. Sci. Eng. 22 (2022) 065602 (1400-1412)

DOI: 10.35414/akufemubid.1147118

Araştırma Makalesi / Research Article

## Yerinde Erken Yaş Beton Dayanımını Belirlemek İçin Kombine Metotların Geliştirilmesi

Muhammed ULUCAN<sup>1</sup>, Yavuzhan TAŞ<sup>2</sup>, Kürşat Esat ALYAMAÇ<sup>3</sup><sup>1</sup>İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE<sup>2</sup>Köprü Bölümü, Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü, Elazığ, TÜRKİYE<sup>3</sup>İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: [mulucan@firat.edu.tr](mailto:mulucan@firat.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7629-6846>  
[ytas@kgm.gov.tr](mailto:ytas@kgm.gov.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8185-9516>  
[kealyamac@firat.edu.tr](mailto:kealyamac@firat.edu.tr) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3226-4073>

Geliş Tarihi: 22.07.2022

Kabul Tarihi: 23.11.2022

### Öz

Bu çalışma, yerinde erken yaş beton dayanımını yüksek doğrulukla tespit etmek için kombine metotlar geliştirmek ve geliştirilen modelleri uygulama yapısı üzerinde test edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla, Elazığ-Malatya illeri arasında 2016-2020 yılları arasında inşa edilen Yeni Kömürhan Köprüsünün pylon betonlarından, tahribatsız test metodu ölçümleri ve beton numuneler alınmıştır. Elde edilen ölçüm ve numunelerin test sonuçları kullanılarak tepki yüzeyi metodu (RSM) yardımıyla matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modeller esas alınarak tahribatsız test metotlarının ikili kullanımlarıyla üç farklı kombine metot geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda, geliştirilen kombine metotlar, kömürhan köprüsü pylon betonlarının yerinde erken yaş beton dayanımını test etmek için kullanılmıştır. Pylonların 3 ve 7 günlük basınç dayanımları, geliştirilen kombine metotlarla tahmin edilmiştir. Bu tahminler sonucunda, ikili kombine metotların iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen kombine metotlar, Kömürhan köprüsü gibi büyük ve prestijli bir yapıda test edilmiş, yerinde erken yaş beton dayanımını yüksek doğrulukla tahmin ettikleri görülmüştür. Böylece, kombine metotların büyük ve prestijli yapılarda kullanımının önemli miktarda maliyet kazancı, kalıp alma süresinden kaynaklı zaman tasarrufu ve iş gücü kazancı sağlayacağı düşünülmektedir.

### Anahtar kelimeler

Kombine metotlar; Tahribatsız test metotları; Yerinde erken yaş beton dayanımı; Kömürhan köprüsü, Tepki yüzeyi metodu.

## Development of Combined Methods to Estimate Early Age Concrete Strength In-place Using Non-destructive Test Methods: Example of The Kömürhan Bridge

### Abstract

This study aims to develop combined methods to determine the in-place early age concrete strength with high accuracy and test the developed models on the application structure. For this purpose, non-destructive test method measurements and concrete samples were taken from the pylon concretes of the New Kömürhan Bridge built between Elazığ-Malatya Provinces among 2016-2020. Mathematical models are developed with the help of the response surface method (RSM) using the samples' obtained non-destructive test measurements and strength results. Based on the developed mathematical models, three different combined methods have been developed with double use of non-destructive test methods. As a result of this study, the combined methods developed were used to test the in-place early age concrete strength of the Kömürhan Bridge pylons. The compressive strengths of these pylons for 3 and 7 days have been estimated with the combined methods developed. As a result of these estimates, it was seen that the double combined methods gave good results. The combined methods developed have been tested in a large and prestigious building such as the Kömürhan Bridge, and it has been seen that they predict the in-place early age concrete strength with high accuracy. Thus, it has been understood that the use of combined methods in large and prestigious buildings will provide significant cost savings, time savings due to formwork stripping times and labor gain.

### Keywords

Combined methods; Non-destructive test methods; In-place early age concrete strength; Kömürhan bridge; Response surface method.

## 1. Giriş

1800'lü yılların sonundan beri, evler, yollar ve köprüler beton kullanılarak inşa edilmeye başlamıştır. O yıllardan beri betonun kullanımı sürekli artmış ve en yaygın kullanılan yapı malzemesi haline gelmiştir (Kabay & Aköz, 2020). Betonun kullanımının yaygınlaşması ile beraber, beton üzerine yapılan teknik ve akademik araştırmalar artmış ve yoğunlaşmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, betonun kalitesini belirlemek için en etkili yolun betonun basınç dayanımını belirlemek olduğu ortaya konulmuştur (Abrams, 1927). Betonun basınç dayanımı belirlenirken, alınan standart numuneler kalıptan çıkarılır ve küre bırakılır. Daha sonra bu numuneler standart basınç dayanımı testine tabi tutularak betonun basınç dayanımı belirlenir. Ancak zaman içerisinde betonun basınç dayanımının farklı şekillerde belirlenmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

Mevcut yapıların yıllar sonra beton dayanımlarının tespit edilmesi ve kalıp alma sürelerinin tespiti gibi nedenlerden dolayı yerinde beton dayanımının tespiti araştırmacıların gündemine gelmiştir (Jones, 1962). Karot alma yöntemi, betonun yerinde dayanımını belirlemek için gündeme gelen ilk metottur. Bu metot, güvenilir ve yüksek doğruluğa sahiptir. Ancak, yapı elemanına hasar verir, pratik ve ekonomik değildir (Meininger et al., 1977). Bu nedenle, özellikle 1940'lı yıllardan sonra yerinde beton dayanımının belirlenmesi için farklı testler ve cihazlar geliştirilmiştir (Kolek, 1958). Araştırmacılar, dolaylı yoldan basınç dayanımını belirleyecek yöntemler geliştirmeye başlamışlardır. Bu yöntemler, beton dayanımının tespitinde tek başlarına kullanıldıklarında yüksek doğruluklu sonuçlar veremezler (Kheder, 1999). Ancak, alınacak karot numune sayısını azaltmada ve yaklaşık dayanım tespitinde oldukça başarılı olmuşlardır (Giannini ve ark., 2014). Bu yöntemler literatürde tahribatsız test metotları olarak bilinmektedir. Bu yöntemlerden bazıları beton yüzeyine az da olsa bir hasar verebilir. Ancak yapı sisteminin taşıyıcılığını etkilemediği için literatürde tahribatsız test metodu olarak isimlendirilmiştir (Malhotra, 1984). Tahribatsız test metotları, betonun farklı özelliklerinden faydalanarak, beton basınç dayanımının tahmin edilmesini sağlar (Fodil et al., 2021). Örneğin, beton test çekici yöntemi; yüzey sertliğinden, ultrases geçiş hızı; boşluk oranından, penetrasyon metotları; sertlik ve batma direncinden faydalanarak, beton basınç dayanımını tahmin etmeye çalışır (Alyamac ve ark., 2018). Ancak bu test

metotlarının çeşitli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Özellikle ultrases geçiş hızı beton numunelerin nem içeriğinden etkilendiği için test edilecek numune yüzeylerinin kuru olmasına ekstra özen gösterilmelidir (Kocamaz ve ark., 2021).

Özellikle günümüzde çok prestijli yapılar inşa edilmektedir. Farklı malzeme ve taşıyıcı sistem özellikleri kullanılarak binalar, köprüler, tüneller ve barajlar inşa edilmektedir. Bu tür yapıların betonla üretilen bölümlerinde üretimin hızlı olması büyük önem taşımaktadır. Çünkü imalat hızı, maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle kalıp alma sürelerinin kısa olması, zaman ve maliyet açısından önemli kazançlar sağlamaktadır. Ayrıca, kalıp alma sürelerinin doğru belirlenmesi, sistemin taşıyıcılığı ve güvenliği için çok önemlidir. Bu nedenle betonun basınç dayanımının sürekli takip edilmesi gerekir. Bunu sağlamak için çok sayıda standart beton numune alınması gerekmektedir. Ancak çok sayıda numune almak, beraberinde iş gücü, zaman ve ekonomi problemleri getirmektedir. Bu nedenle betonun dayanım kazanma hızının tahribatsız test metotlarıyla tespiti, çok önemli avantajlar sağlamaktadır (Lee & Kalos, 2014).

Tahribatsız test metotlarının her birinin farklı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Dezavantajlı yönlerinden dolayı beton dayanımının tahmin oranları düşmektedir. Bu olumsuz durumun en aza indirilmesi ve yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmesi için son zamanlarda 'kombine metotlar' geliştirilmektedir. Yani birden fazla tahribatsız test metodu birlikte kullanılmakta ve daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmeye çalışılmaktadır (Lim & Cao, 2013). Yapılan araştırmalar, kombine metotların başarı oranlarının yüksek olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada, yerinde erken yaş beton dayanımını yüksek doğrulukla tahmin etmek için üç farklı kombine metot geliştirilmiş ve uygulama yapısı üzerinde bu metotların etkinliği incelenmiştir. Uygulama yapısı olarak, Elazığ-Malatya illeri arasında yeni inşa edilen Kömürhan Köprüsü seçilmiştir. Kömürhan köprüsü pylon betonlarından sürekli numuneler ve tahribatsız test metodu ölçümleri alınmıştır. Bu çalışmada, tahribatsız test metotlarından ultrases geçiş hızı, windsor probe penetrasyon ve olgunluk metodu kullanılmıştır. Bu testler sonucunda elde edilen ölçümler ve numune sonuçları kullanılarak RSM'de analizleri yapılmış ve üç farklı kombine metot geliştirilmiştir. Geliştirilen kombine metotlar, Kömürhan köprüsü pylon

betonlarında test edilmiştir. Bu amaçla, geliştirilen kombine metotların tahmin ettiği dayanım sonuçları ile pilon betonlarından alınan numunelerin dayanım sonuçları karşılaştırılmış ve bağıl hata oranları (BHO) hesaplanmıştır. Sonuç olarak, geliştirilen kombine metotların yerinde erken yaş beton dayanımını yüksek doğrulukla tespit ettiği görülmüştür. Buradan, geliştirilen kombine metotların güvenilir, pratik ve ekonomik olduğu tespit edilmiştir. Özellikle hızlı inşa edilen önemli yapıların beton denetimlerinin ve dayanım kazanma hızlarının bu metotlar kullanılarak tespit edilmesinin önemli kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.

## **2. Materyal ve Metot**

### **2.1 TAHRİBATSIZ TEST METOTLARI**

Tahribatsız test metotları, birçok yapı malzemesinin farklı özelliklerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tahribatsız test metotları yardımıyla betonun dayanım, boşluk yapısı ve durabilite gibi birçok özelliği tespit edilmektedir. 1900'lü yılların başlangıcından itibaren beton kullanımı giderek artmıştır. Bununla beraber yerinde beton dayanımının tespiti ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyacın karşılanması için karot numune alma tekniği geliştirilmiştir (Swamy & Al-Hamed, 1984). Bu yöntem, yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine rağmen birçok farklı dezavantajlar içermektedir. Bu nedenle, araştırmacıları yeni yöntemler geliştirmeye sevk etmiştir. Bu çalışmalar sonucunda tahribatsız test metotları ile ilgili gelişmeler yaşanmaya başlanmıştır. Bu gelişmeler sonucunda tahribatsız test metotları, Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (ASTM), Kanada Standartlar Birliği (CSA), Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO), İngiliz Standartları Enstitüsü (BSI) ve birçok ülke tarafından standartlaştırılmıştır.

Beton için kullanılan tahribatsız test metotlarını iki grupta toplamak mümkündür. Birinci grup; beton dayanımını tahmin etmek için kullanılan yöntemlerden oluşur: Yüzey sertliği, penetrasyon direnci, ultrases geçiş hızı ve olgunluk metotlarıdır. Bu yöntemlerin bir kısmı yüzeyde bir miktar hasara neden olduğu için tam anlamıyla tahribatsız değildir. Ancak bunlar yine de literatürde, tahribatsız test metotları olarak isimlendirilmektedir. İkinci grup; nem içeriği, yoğunluk, kalınlık, özdirenç ve geçirgenlik gibi diğer beton özelliklerini ölçen metotları içerir. Bu yöntemler; gerilim dalga yayılımı, zemin probelama radarı ve betondaki çatlakları ve boşlukları bulmak için kullanılan kızılötesi termografi teknikleridir.

#### **2.1.1 PENETRASYON DİRENCİ YÖNTEMLERİ**

Penetrasyon direnci yöntemleri, probelerin (çelik çubukların veya pimlerin) betona batma derinliğinin belirlenmesi ilkesine dayanır. Bu batma derinliği, beton numunesinin dayanımının bir ölçüsüdür. Penetrasyon direnci yöntemleri yardımıyla beton basınç dayanımının tahmini 1954'de Voellmy tarafından başlatılmıştır (Voellmy, 1954). 1960'lı yıllarda, Windsor probe test sistemi ABD'de tanıtılmış ve onu 1980'lerde Kanada'da pin penetrasyon test yöntemi izlemiştir.

1964 ve 1966 yılları arasında, laboratuvarında ve yerinde beton basınç dayanımını belirlemek için Windsor probe olarak bilinen bir cihaz geliştirilmiştir. Cihazın çalışma prensibi, beton yüzeyine batan probelar yardımıyla batma derinliği ölçülerek beton basınç dayanımı tahmin edilir. Windsor probe, beton test çekici gibi betonun yüzey sertliğine bağlı bir test cihazıdır. Bu test sistemi, probe'un batma derinliğinin ölçülmesiyle beton basınç dayanımının belirlenmesi prensibine dayanır (Malhotra, 1976). Windsor probe test aleti Şekil 1.a'da görülmektedir.

#### **2.1.2 ULTRASES GEÇİŞ HIZI YÖNTEMİ (UPV)**

Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi, beton numune üzerine gönderilen dalgaların bir gönderme ve alma noktası arasında yayılması için geçen süreyi ölçerek beton basınç dayanımının tahmin edilmesini sağlar (Bogas & Gomes, 2013). Bu yöntemde, test edilen beton elemana zarar vermeyecek mekanik dalgalar kullanıldığı için gerçekten tahribatsız bir yöntemdir. Bir test örneği, aynı şartlarda tekrar tekrar test edilebilir, bu da betonun davranışının izlenmesi için oldukça yararlıdır.

Ultrases geçiş hızı test cihazı, test betonu için bir dalga üreten, gönderen (dalga üretici ve verici) ve betondan geçmesi için gereken süreyi ölçen bir araçtan oluşur. Ultrases geçiş hızı test cihazı, ultrases dalgasını iletme ve almak için iki güç çevirici içerir. Beton test etmek için genellikle 25 ile 100 kHz frekanslı güç çeviriciler kullanılır. Test cihazı, taşınabilir, kullanımı kolay şarj edilebilir bir batarya ve şarj ünitesi içermektedir. Bu test cihazı, Şekil 1.b'de görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 1. (a) Windsor Probe test ekipmanı, (b) Ultrases geçiş hızı test ekipmanı.

### 2.1.3 OLGUNLUK METODU

Olgunluk metodu; zamanın ve sıcaklığın, betonun basınç dayanımı gelişimi üzerindeki kombine etkilerini incelemektedir. Olgunluk metodunun kökeni, İngiltere’de 1940’ların sonunda ve 1950’lerin başında uygulanan beton buhar kürü üzerinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır.

1950’li yıllarda, zamanın ve sıcaklığın betonun basınç dayanımı gelişimine etkilerini açıklayan bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımda, kür süresi boyunca ölçülen sıcaklık geçmişinin, beton dayanımının göstergesi olacak tek bir sayıyı hesaplamak için kullanılabileceği önerilmiştir. Saul bu tek sayıyı "olgunluk" olarak nitelendirmiş ve basınç dayanımını tahmin etmek için "olgunluk kuralı" nı önermiştir (Saul, 1951).

### 2.2. İSTATİSTİK ANALİZ

Bu çalışma kapsamında yerinde beton dayanımını yüksek doğrulukla belirlemek için 3 farklı kombine metot geliştirilmiştir. Bu kombine metotlar geliştirilirken Kömürhan köprüsünden tahribatsız test metodu ölçümleri ve beton numuneler alınmıştır. Alınan beton numuneler laboratuvarında standart basınç dayanımı testine tabi tutularak basınç dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm verileri ve basınç dayanımı sonuçları, RSM istatistik programı kullanılarak analiz edilmiştir.

RSM, değişkenler ve yanıtlar arasındaki ilişkiyi belirlemede etkili bir araç olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Hammoudi ve ark., 2019). Değişkenler ve sonuçlar arasındaki ilişkiyi belirlemek

Zaman içerisinde birçok olgunluk fonksiyonu geliştirilmiştir. Bu olgunluk fonksiyonları, betonun gerçek sıcaklık geçmişini, basınç dayanımının ne kadar arttığını gösteren bir faktöre dönüştürmek için kullanılır. 1951’de Saul ilk kez zaman ve sıcaklık bileşkeleriyle bağlantılı bir olgunluk fonksiyonu geliştirmiştir. Geliştirilen bu fonksiyon Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu olarak bilinmektedir. Bu çalışmada elde edilen olgunluk değerleri Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu kullanılarak hesaplanmış, beton sıcaklığı 23 °C ve referans sıcaklığı -10 ° C alınmıştır. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu denklem 1’de verilmiştir.

$$\sum_0^t (T-T_0) * \Delta t \quad (1)$$

### 2.2.1 TEPKİ YÜZEYİ MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

için çok iyi bir istatistik araçtır (Demir ve ark., 2022). Bir RSM modeli geliştirmek üç ana adımı içerir. Bunlar; ilgilenilen yanıtın deneysel verilerini toplamak, bir RSM modeli oluşturmak ve doğruluğunu onaylamak, ve son olarak, istenen yanıt değişkenlerini hesaplamak için değişkenleri optimize etmek (Alyamac ve ark., 2017). Bu çalışmada Kömürhan köprüsünden alınan tahribatsız test metodu ölçümleri ve numunelerin basınç dayanımı değerleri kullanılarak, tepki yüzeyi modelleri oluşturulmuştur. Her yanıt için farklı dereceden modeller denenmiştir. Değişkenler arasındaki etkileşim belirlenmiş ve son model oluşturulmuştur. Tepki Yüzeyi Metodu son

zamanlarda beton teknolojisinde başarı ile uygulanmaya başlamıştır (Myers ve ark., 2016).

Bu çalışmada değişken olarak ultrases geçiş hızı, windsor probe penetrasyon ve olgunluk metotları kullanılmıştır. Ultrases geçiş hızı (V), betonun boşluk oranından faydalanarak betonun dayanımını belirlemek için kullanılmaktadır. Betondaki boşluk oranı azaldıkça geçiş süresi de azalmaktadır. Böylece, geçiş süresini kullanarak betonun dayanımı hakkında fikir vermektedir. Windsor probe penetrasyon (w), probe'un betona batma derinliğine bağlı olarak dayanımın tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Probe'un betonun dışında kalan kısmı ne kadar fazla ise beton dayanımı o kadar fazladır. Olgunluk metodu (M), betonun sıcaklığa bağlı olarak dayanım gelişimini test etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan Nurse-Saul olgunluk fonksiyonuna göre sıcaklık arttıkça beton basınç dayanımı da artmaktadır. Yani, değişkenler belirlenirken beton dayanımı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve uygulanacak test metotları buna göre belirlenmiştir. Bu değişkenlere ait değişim aralıkları Çizelge 5'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan değişkenlerin düşük değerleri -1, yüksek değerleri ise +1 olarak değerlendirilmektedir. Aynı zamanda 0 olarak belirtilen değer ise düşük ve yüksek değerlerin aritmetik ortalamasıdır.

**Çizelge 5.** Değişkenler ve değişim aralıkları

| Semboller   |     | Değişim aralıkları |       |       |
|-------------|-----|--------------------|-------|-------|
| Değişkenler | Kod | -1                 | 0     | 1     |
| W           | A   | 53,9               | 56,55 | 59,2  |
| V           | B   | 3,1                | 3,85  | 4,6   |
| M           | C   | 792                | 11484 | 22176 |

## 2.2.2 UYGUN MODELİN BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, toplam 7 veriye sahip bir RSM modeli oluşturulmuştur. Deneysel tasarım ve analiz için piyasada bulunan bir yazılım paketi (Design Expert) kullanılmıştır (El-Housseiny ve ark., 2019). Yapılan analizlerde kullanılan tahribatsız test metotlarına ait ölçümler ve basınç dayanımı sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

**Çizelge 6.** Tahribatsız beton test sonuçları

| Yaş (gün) | Ultrases geçiş hızı (km/s) | Windsor probe (mm) | Olgunluk (°C.saatt) | Basınç Dayanımı (MPa) |
|-----------|----------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| 1         | 3,1                        | 53,9               | 792                 | 56,5                  |
| 2         | 3,2                        | 54,6               | 1584                | 57,2                  |

|    |     |      |       |      |
|----|-----|------|-------|------|
| 3  | 3,6 | 55,0 | 2376  | 60,2 |
| 5  | 3,7 | 55,2 | 3960  | 59,9 |
| 7  | 4,0 | 57,1 | 5544  | 62,8 |
| 14 | 4,4 | 58,3 | 11088 | 66,1 |
| 28 | 4,6 | 59,2 | 22176 | 69,4 |

Bu çalışmada yerinde beton dayanımını yüksek doğrulukla tahmin edebilmek için üç farklı model geliştirilmiştir. Bu modeller geliştirilirken w, V ve M değişkenleri dikkate alınmıştır. Bu değişkenlerin ikili ve üçlü kullanımlarıyla modeller tasarlanmıştır. Modeller tasarlanırken farklı değişkenler kullanılmıştır. Model 1 tasarlanırken iki değişken dikkate alınmış, V ve M değerleri kullanılmıştır. Model 2 tasarlanırken M, w değerleri kullanılmıştır. Son olarak model 3 tasarlanırken w, V değerleri kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin yeterliliğini doğrulamak için temel olarak P değerleri ve F değerleri kullanılmaktadır. Bu değerleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Modellere ait ANOVA sonuçları Çizelge 7'de sunulmuştur.

**Çizelge 7.** Modellerin regresyon analizi sonuçları

| Modeller | MSE  | F-değeri | P-değeri | R <sup>2</sup> |
|----------|------|----------|----------|----------------|
| Model 1  | 65,1 | 1229,1   | <0,0001  | 0,99           |
| Model 2  | 66,2 | 110,6    | 0,0003   | 0,95           |
| Model 3  | 65,3 | 133,6    | 0,0002   | 0,96           |

Geliştirilen modellere ait analiz sonuçları incelendiğinde Mean square error (MSE) değerleri sırasıyla 65,1-66,2-65,3'dür. MSE değerlerinin giderek azalması, modellerin belirlilik katsayıları (R<sup>2</sup>) ile ilişkilidir. MSE değerleri ortalama hata değerlerinin karesi olarak bilinmektedir. Modellerin doğruluk derecesi arttıkça bu değer giderek azalmaktadır. Modellere ait belirlilik katsayıları sırasıyla 0,99-0,95-0,96'dır. Buradan model 1'in belirlilik katsayısının en yüksek olduğu görülmektedir. Yani, belirlilik katsayıları arttıkça modelin MSE değerleri azalmaktadır. Aynı zamanda modellerin yeterliliğini doğrulamak için F değerleri de kullanılmaktadır. Bu değerler sırasıyla 1229,1-110,6-133,6'dır. Buradan da modelin belirlilik katsayısı arttıkça F değerlerinin arttığı da görülmektedir. Ayrıca, geliştirilen tüm modellerin P değerlerinin de <0,0005 olması modellerin anlamlı ve değerli olduğunu bir kez daha göstermektedir. Modellerin anlamlı ve değerli oldukları belirlendikten sonra, her değişkenin yanıtlar üzerindeki etkisini değerlendirmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Her değişkenin önemi, analiz sonucunda elde edilen P değerlerine bağlıdır.

Değişkenlere ait P değerleri incelendiğinde terimlerin anlamlı olduğu ve katkılarının modeli iyileştirdiği görülmüştür.

Geliştirilen üç farklı modele ait katsayılar ve ilgili P değerleri Çizelge 8’de sunulmuştur. Değişkenlerin p değerleri incelenmiş ve modelde 'önemli bir terim' olarak kabul edilmiştir. Çizelge 8’de verilen katsayılar kullanılarak modellere ait denklemler verilmiştir.

**Çizelge 8.** Geliştirilen modellerin Anova sonuçları

| Modeller | Model Terimleri |     | F <sub>c</sub><br>(MPa) |          |
|----------|-----------------|-----|-------------------------|----------|
|          | Gerçek          | Kod | Katsayı                 | P-değeri |
| Model 1  | V               | A   | 5,911                   | <0,0001  |
|          | M               | B   | 0,00019                 | 0,0023   |
|          | Sabit           |     | 37,97                   |          |
| Model 2  | M               | A   | 0,000168                | 0,1721   |
|          | w               | B   | 1,712                   | 0,0110   |
|          | Sabit           |     | -35,6                   |          |
| Model 3  | w               | A   | 0,914                   | 0,2567   |
|          | V               | B   | 4,998                   | 0,1117   |
|          | Sabit           |     | -8,64                   |          |

$$f_c = 5,911 * V + 0,00019 * M + 37,97 \quad (2)$$

$$f_c = 0,000168 * M + 1,712 * w - 35,6 \quad (3)$$

$$f_c = 0,914 * w + 4,998 * V - 8,64 \quad (4)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ

Kömürhan Köprüsü; Elazığ–Malatya yolunun 51. kilometresinde geçişi sağlayan köprüdür. Bu geçiş hattında bulunan tek köprü olduğu için lojistik önemi oldukça büyüktür. Kömürhan Köprüsü,

Malatya ve Elazığ arasında ulaşımı sağlayan en kısa güzergâh üzerinde bulunması sebebiyle hemen hemen alternatifsizdir.

Kömürhan Köprüsü yapılmadan önce Elazığ–Malatya illeri arasındaki ulaşım çeşitli yollarla yapılmaktaydı. 1930’lu yıllara kadar ulaşım sadece sal ve kayıklarla, daha sonra ise I. Dünya Savaşı yıllarında yapılmış olan ahşap bir köprü ile sağlanmıştır. Fakat ilerleyen yıllarda ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşım tekrar dönülmüştür. Ahşap Kömürhan köprüsü Şekil 2.a’da verilmiştir. Fırat Nehri’nin Kömürhan Boğazı mevkiinde, yüksek ayaklı ve geniş açıklıklı betonarme bir köprü yapılması kararlaştırılmış ve 1930’da ihale edilmiştir. İhaleyi kazanan İsveç firması olan Nydqvist ve Holm A.Ş. tarafından 1932’de yapımı tamamlanmıştır. Toplam 164 m uzunluğunda, 6,40 m genişliğinde Betonarme Ankastre Kemer tipindeki Kömürhan Köprüsü, 109,6 metre orta açıklık uzunluğuyla, dönemi itibariyle dünyanın en büyük altıncı betonarme köprüsü olma özelliğini kazanmıştır. Bu Kömürhan Köprüsü şekil 2.b’de verilmiştir.

1932’de hizmete açılan köprü, 1980’li yıllarda yapılan Karakaya Barajı nedeniyle su altında kalmıştır. Halen trafiğe hizmet veren mevcut köprünün yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanmış, eski köprü su altında kalmadan önce 08.04.1986 yılında tamamlanarak trafiğe açılmıştır. Bu yapı, Türkiye’nin ilk dengeli konsol yöntemiyle imal edilmiş köprüsü olma özelliği taşımaktadır. Kömürhan Köprüsü 288 m boyunda, 11,5 m genişliğindedir. Orta açıklığı 135 m, kenar açıklıkları da 76,5 m olmak üzere üç açıklıktan meydana gelmiştir. Halen hizmet veren Kömürhan köprüsü Şekil 2.c’de verilmiştir.

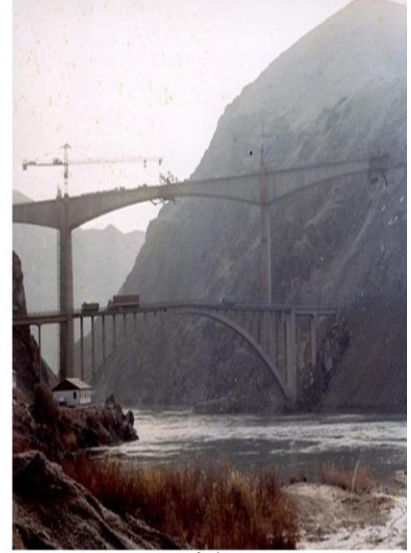




(a)



(b)



(c)

**Şekil 2.** Kömürhan Köprüsü (a) 1900'lü yılların başında, (b) 1932-1986 aralığında, (c) Halen hizmet veren.

Acil Eylem Programı kapsamında; Elazığ–Malatya illeri arasında hizmet veren karayolunun bölünmüş yola dönüştürülmesi ile ilgili çalışmaların tamamlanmasıyla, mevcut köprünün bulunduğu noktada darboğaz oluşmuştur. Bu olumsuz durumun düzeltilmesi amacıyla Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından eski köprü kullanılmak şartıyla yeni bir köprü yapımına karar verilmiştir. Yeni köprü Gergin Eğik Askılı tip olarak dizayn edilmiştir.

Yeni Kömürhan köprüsü 180 m kenar açıklığa, 380 m orta açıklığa ve 100 m yaklaşım köprüsüne sahip olup toplam 660 m uzunluğundadır. Yaklaşım köprüsü arduvaz betonuarme döşeme, ana açıklık

ise ortotropik çelik döşemedir. Ana açıklık 3,6 m'lik başlangıç anosu, 11,4 m'lik 1 adet ano, 16 m'lik 21 adet ano, 6,40 m'lik 1 adet anodan ve 2,1 metrelik anolardan (toplam 25 adet) oluşmaktadır.

Yeni Kömürhan Köprüsünde ters-Y tipi kule olarak tasarlanmış ve 168,5 m yüksekliğe sahiptir. Ana açıklık 21 adet kablo ile pilona taşınmaktadır. 1 adet kablodaki halat sayısı 50 ile 100 arasında, kablo uzunlukları ise 106 m ile 390 m arasında değişmektedir. Yeni Kömürhan Köprüsü Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Yeni Kömürhan Köprüsü

### 3.2 YERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Kömürhan Köprüsü pilon betonlarının, dayanım gelişim kontrolü ve kalıp alma sürelerinin doğru tespiti için tahribatsız test metotları kullanılarak, kombine metotlar geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, ultrases geçiş hızı, windsor probe ve olgunluk metotları için yerinde testler yapılmış ve ölçümler alınmıştır. Her üç metrelik pilon kademesi ayrı bir numara ile isimlendirilmiştir. Ancak aynı kottaki pilonların numarası değişmemekte, sadece sağ ve sol olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışmada, Elazığ SEZA Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

| Özellik (%)                    | CEM I 42.5 R | Özellik                            | CEM I 42.5 R |
|--------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 18,92        | Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,13         |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,74         | Priz başlangıcı (dk)               | 150          |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,69         | Priz sonu (dk)                     | 235          |
| CaO                            | 63,53        | İncelik (cm <sup>2</sup> /g)       | 3828         |
| Cl                             | 0,017        | Basınç dayanımı (MPa)              | 28,4         |
|                                |              | 2 gün                              |              |
| Ç. Kalıntı                     | 0,96         | 7 gün                              | 40,5         |
| K. Kaybı                       | 3,39         | 28 gün                             | 51,4         |

Bu çalışmada, agrega olarak Elazığ İli Baskil İlçesi'nden elde edilen en büyük tane çapı 31,5 mm olan kalker agregası kullanılmıştır. İri (kalker), orta (kalker) ve ince (kalker taş tozu) malzemenin fiziksel özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Agregaların fiziksel özellikleri

| Özellik                          | Birimi            | Kırma Kum | Orta Kalker | İri Kalker |
|----------------------------------|-------------------|-----------|-------------|------------|
| Metilen mavisi                   | g                 | 0,75      | -           | -          |
| Los Angeles aşınma               | %                 | -         | -           | 14,2       |
| Doygun yüzey kuru tane yoğunluğu | g/cm <sup>3</sup> | 2,64      | 2,64        | 2,68       |
| Su emme                          | %                 | 1,8       | 1,3         | 0,8        |



Bu çalışmada, TS EN 450-1'e göre sınıflandırılmış, uçucu küle ait kimyasal özellikler Çizelge 3'de sunulmuştur.

**Çizelge 3.** Uçucu külün kimyasal içerikleri

| Uçucu Kül | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | SO <sub>3</sub> | MgO | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | TiO <sub>2</sub> | MnO |
|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|-----|-------------------|------------------|------------------|-----|
|           | 58,6             | 14,6                           | 7,1                            | 11,1 | 3,3             | 2,6 | 0,4               | 1,2              | 0,5              | 0,3 |

Kömürhan Köprüsü pilon betonunun içeriği Karayolları Genel Müdürlüğü ARGE Daire Başkanlığı tarafından belirlenmiştir. Bu betonların karışım oranları ve malzeme miktarları hep aynı kalmış ve değiştirilmemiştir. Bu beton karışımına ait karışım oranları Çizelge 4'de verilmiştir. Kömürhan Köprüsüne ait beton numunelerin basınç dayanımlarının tespit edilmesi için 150x150x150

mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Basınç dayanımı testleri TS EN 12390-3 standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler teste tabi tutulduklarında yüzey kuru doymun durumda olmalarına özen gösterilmiştir.

**Çizelge 4.** Kömürhan Köprüsü beton karışım oranları

| Seri Adı | Çimento (kg/m <sup>3</sup> ) | Uçucu Kül (kg/m <sup>3</sup> ) | Süper akışkanlaştırıcı (%) | S/Ç  | Kum (0-4) (kg/m <sup>3</sup> ) | Orta Çakıl (4-16) (kg/m <sup>3</sup> ) | İri Çakıl (16-31,5) (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------|--------------------------------|--|--|
| Kömürhan | 436                          | 52                             | 0,9                        | 0,33 | 832                            | 367                                    | 542                                      |

Ultrases geçiş hızı ölçümleri, ASTM C597-09 standardından faydalanılarak, PUNDIT cihazı yardımıyla yapılmıştır. 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numunelerin pürüzsüz yüzeyleri üzerinde doğrudan yöntemle ölçüm yapılmıştır. Her numuneden en az üç ölçüm alınmış ve en küçük değer hesaplamalarda kullanılmıştır (C597-97, 1997).

Probe penetrasyon testi, ASTM C803/C803M-03 standardından faydalanılarak, Windsor Probe test ekipmanları yardımıyla yapılmıştır (ASTM, 1999). Bu testin yapılması için 200x200x100 mm boyutlarında özel bir numune üretilmiştir. Her numuneye bir penetrasyon testi uygulanmıştır. Bu test düşük (d) ve standart (s) enerjili olarak iki şekilde uygulanmaktadır. Düşük enerjili penetrasyon deneyinde Windsor Probe aletinin içine yerleştirilen metal probe, namlu içerisinde 5 cm içeri doğru itilmektedir. Standart enerjili olarak deneyin yapılması durumunda metal probe'un namlunun içine doğru itilmesi işlemi yapılmamaktadır. İlk testler yapılırken düşük enerji ile deneye

başlanmıştır. Probe'un batma derinliği dikkate alınarak, testin hangi enerji seviyesi ile yapılacağına karar verilmiştir. Uygulanan windsor probe testleri standart enerji seviyesi ile yapılmıştır. Penetrasyon testinin sonucu, metal probe'un betonun dışında kalan kısmının uzunluğudur.

Olgunluk indeksleri, ASTM C918-02 ve ASTM C1074-98 standardından faydalanılarak, sertleşmiş beton sıcaklığının belirli zamanlarda ölçülmesiyle hesaplanmıştır (ASTM, 1998). Olgunluk eğrisinin belirlenmesi için Kömürhan Köprüsü şantiye sahasında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Köprü ayağının beton kademelerinden (7. Kademedan 43. Kademeye kadar) 4 gün boyunca her 24 saatte bir sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu sıcaklık ölçümleri, özel kablolar yardımıyla beton kesitin yaklaşık 90 cm içinden yapılmıştır. Laboratuvar ortamında ise özel kür sandıkları kullanılmış ve belirli yaşlarda sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuşlardır. Olgunluk denkleminde kullanılan beton sıcaklığı sabit ve 23 °C olarak alınmıştır.

### 3.3. MODELLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada yerinde erken yaş beton dayanımını yüksek doğrulukla belirlemek için farklı kombine metotların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Kömürhan köprüsü pilon betonlarından tahribatsız test metodu ölçümleri ve numuneler alınmıştır. Alınan bu numuneler standart basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen tahribatsız test metodu ölçümleri ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 6'da verilmiştir. Çizelgede verilen değerler kullanılarak RSM'de analizleri yapılmış ve üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modeller geliştirilirken farklı test metotları kullanılmış ve bunların basınç dayanımı tahmini üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Bu incelemeler yapılırken, değişken olarak w, V ve M değerleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen modelleri test etmek için uygulama yapısı olarak Kömürhan köprüsü seçilmiştir. Geliştirilen modellerin tahmin ettikleri basınç dayanımı değerleri ile pilon betonlarının 3 ve 7 günlük basınç dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda modellere ait BHO değerleri tespit edilmiştir. BHO, Denklem 5 yardımıyla hesaplanmıştır. Modellere ait BHO,

deney sonuçları ve modellerin tahmin ettikleri basınç dayanımı değerleri Çizelge 9'da verilmiştir.  
 $BHO (\%) = (Deneysel-Model)/Deneysel*100$  (5)

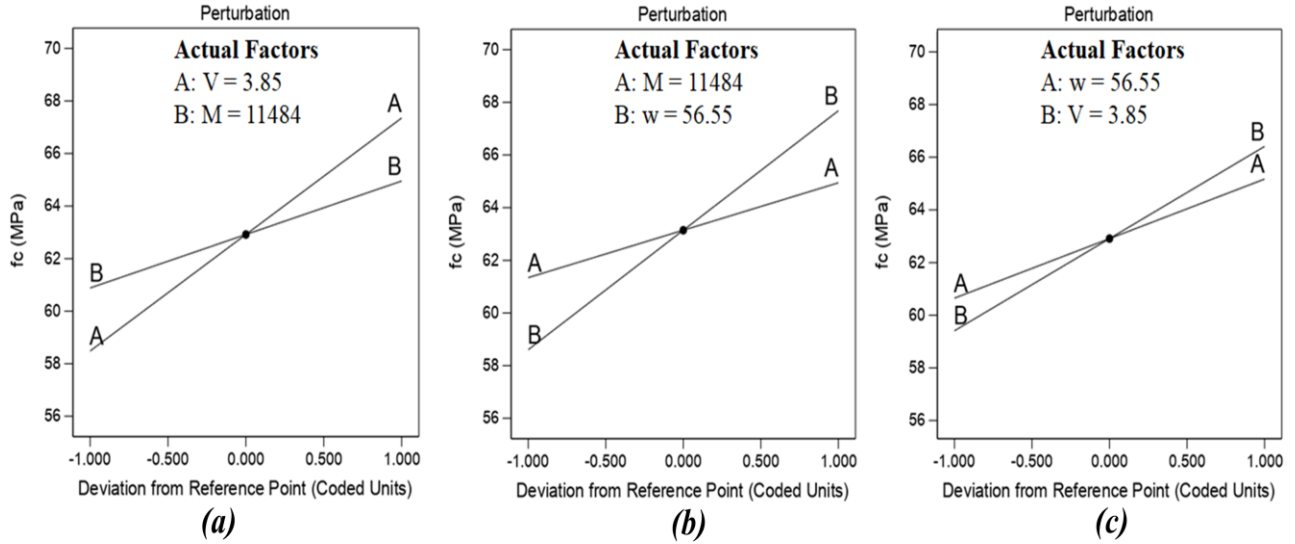
Çizelge 9'da modellere göre bağıl hata oranları görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda modellere ait belirlilik katsayıları sırası ile 0,99-0,95-0,96 olarak hesaplanmıştır. Modellerde belirlilik katsayıları arttıkça modellerin tahmin doğruluğu da artmaktadır. Ancak, burada fc-3 gün belirlenirken çarpıcı bir etki görülmektedir. fc-3 gün'ün tahmininde model 1'in BHO oranının, model 2'in BHO oranından daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, fc-3 gün yani erken yaş dayanımında kullanılan tahribatsız test metotlarının farklı olmasının erken yaş dayanımında daha net değişimlere olanak sağlamasıdır. Bu nedenle, kullanılacak tahribatsız test metotlarının seçimi de oldukça önemlidir. fc-7 gün için basınç dayanımı tahminleri ve bağıl hata oranları incelendiğinde ise belirlilik katsayıları arttıkça modellerin tahmin doğruluğu giderek artmaktadır. Özellikle model 3'ün fc-7 gün için tahmin doğruluğu oldukça iyidir. Bu modele göre BHO değerlerinin fc-7 gün için %10'un altında kaldığı görülmektedir

Çizelge 9. Geliştirilen modellerin uygulama yapısı üzerindeki sonuçları

| Yanıtlar          | Seri Adı   | Deney | Model 1 | Model 2 | Model 3 | BHO 1 (%) | BHO 2 (%) | BHO 3 (%) |
|-------------------|------------|-------|---------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
| fc-3 gün<br>(MPa) | P 14 SOL   | 55,1  | 59,6    | 59,0    | 59,7    | -8,1      | -7,1      | -8,4      |
|                   | P 20 SAĞ   | 55,6  | 59,0    | 58,7    | 59,0    | -6,2      | -5,6      | -6,2      |
|                   | P 25 SOL   | 57,1  | 59,1    | 58,4    | 58,9    | -3,5      | -2,4      | -3,1      |
|                   | P 28 C SOL | 51,9  | 60,4    | 55,8    | 58,4    | -16,4     | -7,5      | -12,5     |
|                   | P 37 ANO   | 55,6  | 59,6    | 57,6    | 59,0    | -7,1      | -3,7      | -6,1      |
|                   | P 41 ANO   | 48,6  | 58,5    | 52,6    | 55,2    | -20,3     | -8,2      | -13,7     |
| fc-7 gün<br>(MPa) | P 14 SOL   | 61,4  | 62,3    | 64,9    | 64,6    | -1,5      | -5,6      | -5,3      |
|                   | P 20 SAĞ   | 57,4  | 61,9    | 63,8    | 63,5    | -7,8      | -11,1     | -10,6     |
|                   | P 25 SOL   | 63,8  | 61,5    | 64,1    | 63,1    | 3,6       | -0,5      | 1,1       |
|                   | P 28 C SOL | 61,3  | 62,3    | 64,3    | 63,6    | -1,6      | -4,9      | -3,7      |
|                   | P 37 ANO   | 65,3  | 61,8    | 64,5    | 64,0    | 5,4       | 1,2       | 2,0       |
|                   | P 41 ANO   | 58,2  | 61,4    | 63,2    | 62,6    | -5,5      | -8,5      | -7,6      |

Geliştirilen modellere ait değişkenlerin, yanıtlar üzerindeki sonuçlarını daha iyi açıklayabilmek için pertürbasyon eğrileri kullanılmaktadır. Geliştirilen modellere ait pertürbasyon eğrileri Şekil 4'te verilmiştir. Model 1'e ait pertürbasyon eğrisi incelendiğinde R değeri arttıkça basınç dayanımı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Aynı zamanda w değerleri de arttıkça basınç dayanımı değerlerinde artma meydana gelmektedir. Pertürbasyon eğrilerinde 42,5, 56,55 olarak verilen değerler, değişkenlere ait en düşük ve en yüksek değerlerin

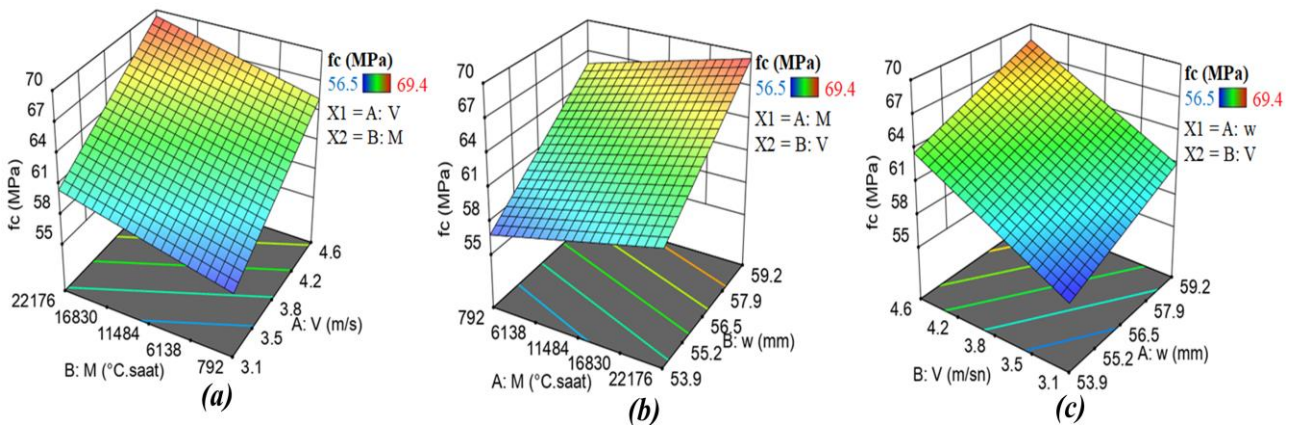
aritmetik ortalamasını ifade etmektedir. Bu değerler, pertürbasyon eğrisinde 0 noktasına karşılık gelen değerleri belirtmektedir. Model 2'e ait pertürbasyon eğrisi incelendiğinde yine R değeri ve V değerleri arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmektedir. Model 3'e ait pertürbasyon eğrisi incelendiğinde de yine benzer sonuçlar görülmektedir. V, w ve M değerlerinde artış meydana geldikçe basınç dayanımı değerleri de artmaktadır.



Şekil 4. Modellere ait pertürbasyon eğrileri (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3

Modellere ait sonuçların en iyi şekilde görselleştirilmesi için iki boyutlu ve üç boyutlu grafikler kullanılmaktadır. Basınç dayanımını tahmin etmek için geliştirilen modellere ait iki ve üç boyutlu grafikler Şekil 5’de verilmiştir. Modellere ait bu etki grafikleri incelendiğinde  $w$ ,  $V$  ve  $M$  değerleri arttıkça betonun basınç dayanımının arttığı açıkça görülmektedir. Buradan, kullanılan tahribatsız test metotları ile basınç dayanımı arasında doğru bir orantının olduğu da görülmektedir. Betonun dayanımı arttıkça beton test çekicinin geri tepme miktarı, probe’un dışarıda kalan uzunluğu artmaktadır. Aynı zamanda, beton dayanımı arttıkça betonun boşluk oranı azalmakta ve geçiş süresi azalmaktadır. Bu nedenle geçiş süresi değerlerinde

de bir artış gözlemlenmektedir. Hesaplanan olgunluk değerlerinde kullanılan Nurse-Saul fonksiyonuna göre de sıcaklık değeri arttıkça beton basınç dayanımı da artmaktadır. Yani bu çalışma sonucunda, geliştirilen tüm modellerin literatür sonuçları ile uyumlu olduğu ve iyi sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Ancak geliştirilen modellerin erken yaş dayanım değerlerini deney sonuçlarından daha fazla tahmin etmektedir. Ancak hem geliştirilen tüm modellerin belirlilik katsayılarının 0.95’in üzerinde olması hem de tahmin sonuçlarındaki ortalama hatanın %10’un altında kalması geliştirilen modellerin önemli bir öngörü sağlayacağını göstermektedir.



Şekil 5. Modellere ait 3 boyutlu etki grafikleri (a) Model 1, (b) Model 2, (c) Model 3

#### 4.SONUÇLAR

Betonun basınç dayanımı, betonun kalitesini belirlemek için kullanılan en etkin parametredir. Bu nedenle betonun basınç dayanımının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada tahribatsız test metotları kullanılarak yerinde beton basınç dayanımının tahmin edilmesi için farklı kombine metotlar geliştirilmiştir. Geliştirilen bu kombine metotlar uygulama yapısında test edilmiştir. Bu çalışmanın amacı, özellikle prestij yapılarında erken kalıp alma süresinin doğru tespiti için, tahribatsız test metotları kullanılarak kombine metotlar geliştirmek ve geliştirilen bu metotlar yardımıyla yerinde beton basınç dayanımını yüksek doğruluklu tahmin edilmesini sağlamaktır. Bu amaçla ikili ve üçlü kombine metotlar geliştirilmiştir. Ayrıca, literatürde üçlü kombine metotlar üzerine yapılan hiçbir çalışmaya da rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda geliştirilen modeller ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Model-1’de beton test çekici ve Windsor probe testi kullanılmıştır. Bunların beraber kullanılmasının sebebi beton test çekicinin beton yüzeyinde hiçbir tahribata sebep olmaması, windsor probe testinin ise betonun bünyesine nüfuz ederek iç özelliklerini dikkate alarak sonuç vermesidir. Her iki tahribatsız test metodunun avantajları ve test sonuçları dikkate alındığında bu kombine metodun erken yaş dayanımının tahmininde yüksek doğruluklu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak bu kombine metodun işletme maliyeti yüksektir. Çünkü Windsor probe testinde her uygulamadan sonra probe ve güç hücresi (mermi) kullanılamaz hale gelmektedir. Ayrıca windsor probe testinin beton yüzeyinde minimum düzeyde de olsa bir yıpranmaya neden olmaktadır. Bu kombine metot kullanılmadan önce bu özelliğin dikkate alınması gerekir. İlaveten kalıp alma sürelerinin önemli olduğu ve hızlı imalat gerektiren yapılarda kullanılması önerilmektedir.
- Model-2’de Ultrases geçiş hızı ve beton test çekici kombine edilmiştir. Bu modellerin birlikte kullanılmasının en önemli nedeni her iki metodun da beton yüzeyine ve bünyesine herhangi bir zarar vermemesidir. Ayrıca bununla beraber her iki metodun işletme maliyetleri oldukça ekonomiktir. Dolayısıyla bu model diğer modellere göre daha düşük işletme maliyetine sahiptir. Ancak ultrases geçiş hızı testinin betonun yüzey nemine olan hassasiyeti dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, özellikle erken yaş dayanım tespitlerinde yaklaşık sonuçlar elde edilmiştir. Eğer yüzey nemi kontrol edilerek ölçümler yapılırsa daha yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır. Bu nedenle, hızlı

imalat ve nihai yaş dayanımının önemli olduğu yapılarda kullanılması önemli miktarda maliyet ve iş gücü kazancı sağlayacaktır.

- Model-3, üç farklı tahribatsız test metodunun birlikte kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Bu model, yüksek doğruluklu bir tahmin yeteneğine sahiptir. Bu modelin en önemli avantajı, yerinde beton dayanımını etkileyen en önemli parametreleri dikkate almasıdır. Hava sıcaklığı ve betonun iç yapısı, bu model kapsamında dikkate alındığından tahmin yeteneği istenilen düzeydedir. Bu modelin diğer bir avantajı hem erken yaş dayanımlarını hem de ileri yaş dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin edebilmesidir. Bu model sonucunda üçlü kombine metotların kullanımının mükemmel sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, bu model literatürde daha önce hiç birlikte kullanılmayan üç tahribatsız test metodunu içermektedir. Bu çalışmayla literatürde üçlü kombine metotlar üzerine araştırmaların arttırılması gerektiği de ortaya çıkmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

- Abrams, D. A. (1927). Water-cement ratio as a basis of concrete quality. *Journal Proceedings*, **23(2)**, 452–457.
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, **144**, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>
- Alyamac, K. E., Yavuzhan, T. A. S., ULUCAN, Z. C., & ULAS, M. A. (2018). *Estimation of concrete strength combining rebound hammer and Windsor probe test methods*.
- ASTM, C. (1998). 1074,“ *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method*,” *ASTM International, West Conshohocken, Pa.*
- ASTM, C. (1999). 803. *Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards*.
- Bogas, J. A., & Gomes, A. (2013). Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete—Characterization and strength prediction. *Materials & Design*, **46**, 832–841.

- C597-97, A. (1997). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*.
- Demir, T., Ulucan, M., & Alyamac, K. E. (2022). Determination of Early Age Strength of High Strength Concretes Using RSM Method. *Firat University Journal of Engineering Science*, **34(1)**, 105–114. <https://doi.org/10.35234/fumbd.972829>
- El-Housseiny, G. S., Aboshanab, K. M., Aboulwafa, M. M., & Hassouna, N. A. (2019). Rhamnolipid production by a gamma ray-induced *Pseudomonas aeruginosa* mutant under solid state fermentation. *AMB Express*, **9(1)**, 1–11.
- Fodil, N., Chemrouk, M., & Ammar, A. (2021). Influence of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity as a non-destructive evaluation of high-performance concrete strength. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, **25(2)**, 281–301.
- Giannini, R., Sguerri, L., Paolacci, F., & Alessandri, S. (2014). Assessment of concrete strength combining direct and NDT measures via Bayesian inference. *Engineering Structures*, **64**, 68–77.
- Hammoudi, A., Moussaceb, K., Belebchouche, C., & Dahmoune, F. (2019). Comparison of artificial neural network (ANN) and response surface methodology (RSM) prediction in compressive strength of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, **209**, 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.119>
- Jones, R. (1962). *Non destructive testing of concrete*. University Press.
- Kabay, N., & Aköz, F. (2020). Investigation of factors affecting core compressive strength and non-destructive testing of concrete. *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, **38(1)**.
- Kheder, G. F. (1999). A two stage procedure for assessment of in situ concrete strength using combined non-destructive testing. *Materials and Structures*, **32(6)**, 410–417.
- Kocamaz, A. F., Ayaz, Y., Karakoç, M. B., Türkmen, İ., & Demirboğa, R. (2021). Prediction of compressive strength and ultrasonic pulse velocity of admixed concrete using tree model M5P. *Structural Concrete*, **22**, E800–E814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/suco.202000061>
- Kolek, J. (1958). An appreciation of the Schmidt rebound hammer. *Magazine of Concrete Research*, **10(28)**, 27–36.
- Lee, S., & Kalos, N. (2014). Non-destructive testing methods in the US for bridge inspection and maintenance. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **18(5)**, 1322–1331.
- Lim, M. K., & Cao, H. (2013). Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness. *Construction and Building Materials*, **38**, 1310–1315.
- Malhotra, V. M. (1976). *Testing hardened concrete: nondestructive methods* (Issue 9). Iowa State Press.
- Malhotra, V. M. (1984). In situ/nondestructive testing of concrete. *ACI SP-82*, 831.
- Meininger, R. C., Wagner, F. T., & Hall, K. W. (1977). Concrete core strength—The effect of length to diameter ratio. *Journal of Testing and Evaluation*, **5(3)**, 147–153.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments*. John Wiley & Sons.
- Saul, A. G. A. (1951). Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure. *Magazine of Concrete Research*, **2(6)**, 127–140.
- Swamy, R. N., & Al-Hamed, A. H. (1984). The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete. *Special Publication*, **82**, 247–276.
- Voellmy, A. (1954). Examination of Concrete by Measurements of superficial Hardness. *Proc. Int. Symp. on Non-Destructive Testing of Materials and Structures, RILEM Paris*, **2**, 323.