



**YERİNDE BETON BASINÇ DAYANIMININ
ETKİLİ BİR ŞEKİLDE BELİRLENMESİ İÇİN MEVCUT
TAHRİBATSIZ TEST METOTLARIYLA
YENİ BİR KOMBİNE YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Yük. Müh. Yavuzhan TAŞ

Doktora Tezi

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Danışman: Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ

Aralık - 2019

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YERİNDE BETON BASINÇ DAYANIMININ ETKİLİ BİR ŞEKİLDE
BELİRLENMESİ İÇİN MEVCUT TAHRİBATSIZ TEST METOTLARIYLA YENİ
BİR KOMBİNE YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ

Doktora Tezi

Yavuzhan TAŞ

041115201

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.07.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.12.2019

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı

Danışman: Doç.Dr.Kürşat Esat ALYAMAÇ

Prof.Dr.Zülfü Çınar ULUCAN

Prof.Dr.Kazım TÜRK

Doç.Dr.Mehmet KARATAŞ

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet BENLİ











ARALIK -2019

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının oluşturulmasında; bana güç ve destek veren, tezimle ilgili çalışmaların başından sonuna takipçisi olup, bana her konuda yardımcı olan Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ'a, deneysel çalışmaların nihayete ermesinde katkıları bulunan, Sayın Araştırma Görevlisi Muhammed ULUCAN'a, İnşaat Mühendisi Sayın Noorul Amin MAWLAWİZADE (Yapı Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi), Yapı Laboratuvarı Teknisyeni Sayın Seyfettin ÇİÇEK'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımın yürütülmesi adına elzem olan deney aletlerinin tedarik edilmesi konusunda, yardımlarını esirgemeyen, doktora çalışmalarım boyunca manevi desteğini teattuf etmeyen; 2016-2018 yılları arasında Karayolları 8. Bölge Müdürlüğü yapan, şu an Karayolları Genel Müdürlüğü, İşletmeler Daire Başkanlığını görevini yürüten, İnşaat Mühendisi Sayın Ahmet GÜLŞEN'e tüm kalbi duygularıyla şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının şantiye kısmında birlikte çalışmaktan onur duyduğum, her an yanımda olduğunu hissettiğim; Sayın İnşaat Mühendisi Taha ÖZDİLEK'e (Kömürhan Köprüsü, Bağlantı Tüneli ve Yolu Yapım İş, Proje Müdürü), Sayın Jeoloji Mühendisi Uğur YAVUZ'a (Kömürhan Köprüsü, Bağlantı Tüneli ve Yolu Yapım İş, Kalite Kontrol Mühendisi), Sayın Necip MUTAF'a (Kömürhan Köprüsü, Bağlantı Tüneli ve Yolu Yapım İş, Kalite Kontrol Mühendisi), her beton dökümünde özverili çalışmalarıyla deneysel çalışmalarına yön veren katkılarıyla Sayın Burak YÖNGÜL'e (Laborant), Sayın Gürsel DEMİR'e (Laborant), bu çalışmanın başından sonuna kadar sürekli bulunan fedakar arkadaşlarım; Sayın Ertan Aydın'a (İnşaat Teknikeri), Sayın Mustafa ARISOY'a (İnşaat Teknikeri) teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmaların yapılabilmesi adına, desteklerini esirgemeyen, Birlik Beton A.Ş. Yönetim Kurulu Üyesi Cengiz Oktay AKYILDIZ'a teşekkür ederim.

Hayatımın tüm güzelliklerini borçlu olduğum babama ve rahmetli anneme, varlığıyla, ilgisiyle ve sonsuz sabrıyla, sınırsız güç bulduğum eşime ve çocuklarım Batuhan ve Yağızhan'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No:

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
2. TAHRİBATSIZ BETON TEST METOTLARI.....	4
2.1. Yüzey Sertliği Metodu	6
2.1.1. Giriş	6
2.1.2. Tarihsel Gelişim	6
2.1.3 Schmidt Beton Test Çekici Metodu	8
2.1.3.1. Çalışma Prensibi	8
2.1.3.2. Tanım.....	8
2.1.3.3. Test Metodu	10
2.1.3.4. Test Prosedürü	10
2.1.3.5. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi	10
2.2. Penetrasyon Direnci Yöntemleri	12
2.2.1. Prob Penetrasyon Test Sistemi	12
2.2.1.1. Prensibleri	13
2.2.1.2. Çalışma Şekli	13
2.2.1.3. Test Metodu	14
2.2.1.4. Korelasyon İşlemleri.....	14
2.2.1.5. Prob Penetrasyon Testinin Değerlendirilmesi	15
2.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi (UPV)	16
2.2.2.1. Tarihsel Gelişim	17
2.2.2.2. Dalga Yayılım Teorisi	17
2.2.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Test Cihazı.....	19
2.2.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi:	21
2.2.2.5. Geçiş Hızını Etkileyen Faktörler	24

2.2.2.6. Uygulamalar	28
2.3. Olgunluk Metodu	30
2.3.1. Tarihsel Gelişim	31
2.3.2. Olgunluk Fonksiyonları.....	31
3. ÇALIŞMA PLANI ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
3.1 Test ve Deney Planı	36
3.2 Malzemeler.....	37
3.3 Deneyler ve Test Metotları.....	40
3.4 Beton Karışım Oranları	41
4. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ ve YERİNDE YAPILAN TESTLER	43
4.1 Kömürhan Köprüsü	43
4.2 Yerinde Yapılan Test ve Ölçümler	47
5. DENEY SONUÇLARI, YERİNDE ÖLÇÜMLER ve DEĞERLENDİRMELER	54
6. KOMBİNE METOTLARIN GELİŞTİRİLMESİ	66
6.1. Tepki Yüzeyi Metodu	66
6.2 Geliştirilen Kombine Metotlar	69
6.3 Geliştirilen Kombine Metotların Kontrol Edilmesi	83
7. SONUÇ ve ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR	90

ÖZET

Günümüzde köprüler, barajlar, tüneller ve çok yüksek katlı yapılar, özel yapılar olarak isimlendirilmektedirler. Bu yapılar inşa edilirken maliyetlerinin azaltılması için hızlı bir imalat söz konusudur. Hızlı imalat yapıldığında en önemli problemlerden biri de kalıp alma süreleridir. Kalıp alma işleminin, beton yeterli dayanıma ulaştıktan sonra yapılması gerekir. Betonun gerekli dayanıma ulaşp ulaşmadığı ya çok sayıda numune alarak ya da tahribatsız test metotlarıyla belirlenir. Çok sayıda standart numune alınması beraberinde ek bir maliyet, iş gücü ve zaman kaybı getirmektedir. Ancak tahribatsız test metotları kullanıldığında hızlı, pratik, istenilen zamanda ve istenilen sayıda test yapılabilir.

Betonda tahribatsız test metotlarının en büyük dezavantajı doğruluk oranlarının tahribatlı yöntemler kadar yüksek olmamasıdır. Literatürde tahribatsız test metodu sonuçlarının doğruluklarının yükseltilmesi için kombine metotlar kullanılması önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında, yerinde beton dayanımının tespit edilmesi amacıyla kombine metotlar geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Elazığ-Malatya İlleri arasında inşa edilmekte olan Yeni Kömürhan Köprüsünün pilonundan, tahribatsız test metotlarıyla ölçümler ve numuneler alınmıştır. Elde edilen ölçüm ve deney sonuçları yardımıyla, betonun yerinde dayanımını tahmin etmek amacıyla kombine metotlar geliştirilmiştir. Bu çalışmaya ilave olarak, laboratuvarında farklı karışımlara sahip betonlar tasarlanmış ve farklı dayanımlara sahip beton numuneler üretilmiştir. Bu numunelere uygulanan testlerin sonuçları kullanılarak, genel anlamda kullanılabilecek bir kombine metot da geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, bu kombine metotlar kullanılarak, yerinde beton dayanımının kabul edilebilir doğrulukta tespit edildiği belirlenmiştir. Dolayısıyla kombine metotlar kullanılarak, yerinde beton dayanımının tahmin edilmesi önemli miktarda maliyet kazancı, zaman tasarrufu ve iş gücü kazancı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Beton basınç dayanımı, tahribatsız test metotları, yerinde beton dayanımı, kombine metot, Kömürhan Köprüsü

SUMMARY

Development of An Efficient Combined Method Using Non-Destructive Test Methods to Estimate the In-Place Strength of Concrete

Today, bridges, dams, tunnels and very high-rise buildings, are called special structures. When constructing these structures, there is a rapid production to reduce the costs. One of the most important problems when fast manufacturing is mold removing time. Removing the mold must be done after the concrete has reached sufficient strength. Whether the concrete reaches the required strength is determined either by taking a large number of samples or by non-destructive testing methods. Taking a large number of standard samples brings additional cost, labor and time. However, when non-destructive testing methods are used, fast, practical, desired time and any number of tests can be performed.

The biggest disadvantage of non-destructive testing methods in concrete is that accuracy rates are not as high as destructive methods. In the literature, it is recommended to use combined methods to improve the accuracy of non-destructive test method results.

In this thesis, it is aimed to develop combined methods in order to determine the in-place strength of concrete. For this purpose, measurements and samples were taken by using non-destructive test methods from the pylon of New Komurhan Bridge which is being constructed between Elazığ-Malatya Provinces. Combined methods have been developed with the help of the obtained measurement and test results to estimate the in-place strength of the concrete. In addition to this study, concretes with different mixtures were produced in the laboratory and concrete samples with different strengths were produced. It was developed in a combined method that could be used in general terms, using the results of tests applied to these samples.

As a result, using these combined methods, it was determined that the in-place strength of concrete was determined with acceptable accuracy. Therefore, estimating in-place concrete strength using combined methods will result in significant cost savings, time savings and labor gains.

Keywords: Compressive strength of concrete, non-destructive test methods, in-place strength of concrete, combine method, Komurhan Bridge

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No:

Şekil 1.	Beton için tahribatsız test metotları ve kullanım alanları.....	5
Şekil 2.	Einbeck sarkaç çekici şematik gösterimi	7
Şekil 3.	Schmidt beton test çekici.....	9
Şekil 4.	Beton test çekicinin şematik görünümü	9
Şekil 5.	Windsor prob ekipmanının genel görünüşü.	13
Şekil 6.	Test öncesi ve sonrası normal ağırlıktaki beton için prob görünümü.	14
Şekil 7.	Ultrases geçiş hızı test sisteminin şematik diyagramı.....	20
Şekil 8.	Ultrases geçiş hızı test cihazı	20
Şekil 9.	Ultrases geçiş hızı ölçüm şekilleri.....	22
Şekil 10.	Tabaka derinliğini (h) belirlemek için yüzey yönteminin kullanılması	23
Şekil 11.	Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu grafiği	32
Şekil 12.	Betonda erken yaş kür sıcaklığının dayanım-olgunluk ilişkisi üzerine etkisi	35
Şekil 13.	Agregaların granülometrisi	39
Şekil 14.	Ahşap Kömürhan Köprüsü (1900'lü yılların başı).....	43
Şekil 15.	Kömürhan Köprüsü (1932-1986).....	44
Şekil 16.	Kömürhan Köprüsü (1986-...).....	45
Şekil 17.	Yeni Kömürhan Köprüsü boykesiti (2020-...).....	46
Şekil 18.	Yeni Kömürhan Köprüsü inşaat çalışmaları (2019).....	47
Şekil 19.	Kömürhan Köprüsü Kulesi şematik görünüşü	49
Şekil 20.	Kömürhan Köprüsü pilon detayları.....	50
Şekil 21.	Beton test çekici testleri	54
Şekil 22.	Birinci adım beton numunelerin ilişki grafikleri	55
Şekil 23.	Farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımı-yaş ilişkisi	56
Şekil 24.	Beton dayanımı ile tahribatsız test metodu arasındaki ilişkiler.....	57
Şekil 25.	Windsor prob testi uygulanmış numuneler ve test cihazı	58
Şekil 26.	Windsor prob test cihazı, ölçüm cihazı ve numuneler	58
Şekil 27.	UPV ölçüm cihazı ve standart beton numune	59
Şekil 28.	Beton dayanımı ile R ve V arasındaki ilişkiler	61
Şekil 29.	Beton dayanımı ile w (mm) arasındaki ilişkiler	62

Şekil 30. Kömürhan Köprüsü pilon betonlarında hava sıcaklığı ile taze beton sıcaklıkları arasındaki ilişki.....	64
Şekil 31. Kömürhan Köprüsü pilon betonlarında hava sıcaklığı ile beton dayanımları arasındaki ilişki	64
Şekil 32. Model-1'e ait iki boyutlu etki grafiği	71
Şekil 33. Model-1'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	71
Şekil 34. Model-1'e ait pertürbasyon grafiği	72
Şekil 35. Model-2'ye ait iki boyutlu etki grafiği	73
Şekil 36. Model-2'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	74
Şekil 37. Model-2'ye ait pertürbasyon grafiği	74
Şekil 38. Model-3'e ait iki boyutlu etki grafiği	76
Şekil 39. Model-3'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	76
Şekil 40. Model-3'e ait pertürbasyon grafiği	77
Şekil 41. Model-4'e ait iki boyutlu etki grafiği	78
Şekil 42. Model-4'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	79
Şekil 43. Model-4'e ait pertürbasyon grafiği	79
Şekil 44. Model-5'e ait iki boyutlu etki grafiği	81
Şekil 45. Model-5'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.....	82
Şekil 46. Model-5'e ait pertürbasyon grafiği	82

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa No:

Tablo 1.	Deney ve analiz planı.....	36
Tablo 2.	Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	38
Tablo 3.	Agregaların fiziksel özellikleri	38
Tablo 4.	Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	39
Tablo 5.	Kömürhan Köprüsü beton karışım oranları	41
Tablo 6.	Üçüncü adım deney serileri beton karışım oranları (kg/m ³).....	42
Tablo 7.	Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin beton basınç dayanımları	51
Tablo 8.	Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin tahribatsız test ölçümleri	52
Tablo 9.	Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin 4 günlük ortalama beton sıcaklıkları.....	53
Tablo 10.	Birinci adım deney sonuçları	54
Tablo 11.	İkinci adım deneyleri beton basınç dayanım sonuçları.....	56
Tablo 12.	İkinci adım deneyleri tahribatsız beton test sonuçları.....	57
Tablo 13.	Üçüncü adım beton serilerinin tahribatsız test sonuçları	60
Tablo 14.	Değişkenler ve değişim aralıkları	70
Tablo 15.	Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.....	70
Tablo 16.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.....	70
Tablo 17.	Değişkenler ve değişim aralıkları	73
Tablo 18.	Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.....	73
Tablo 19.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.....	73
Tablo 20.	Değişkenler ve değişim aralıkları	75
Tablo 21.	Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.....	75
Tablo 22.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.....	75
Tablo 23.	Değişkenler ve değişim aralıkları	78
Tablo 24.	Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.....	78
Tablo 25.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları	78

Tablo 26.	Değişkenler ve değişim aralıkları	80
Tablo 27.	Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.....	81
Tablo 28.	Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.....	81
Tablo 29.	3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-1'e göre basınç dayanımları	84
Tablo 30.	3, 7 ve 28 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-2'ye göre basınç dayanımları	85
Tablo 31.	3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-3'e göre basınç dayanımları.	86
Tablo 32.	3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-4'e göre basınç dayanımları.	86
Tablo 33.	Model-5'in kontrolü ve bağlı hata oranları	87

1. GİRİŞ

1980’li yılların sonundan beri; evler, yollar ve köprüler gibi yapılar beton kullanılarak inşa edilmeye başlanılmıştır. O yıllardan beri beton kullanımı her geçen gün artmış ve yapı malzemesi olarak beton en yaygın kullanılan malzeme haline gelmiştir. Üretimde kullanılan her malzemenin bir standardı olmalıdır ve imalatı bittikten sonra kalitesinin belirlenmesi gerekir. Betonun kullanıldığı ilk yıllarda, beton kalitesi için en önemli parametrenin çimento miktarı olduğu düşünülüyordu. Bu nedenle beton içindeki çimento miktarına göre isimlendiriliyor ve çimento miktarına göre kalitesi belirlenmeye çalışılıyordu [1].

Beton kullanımının başlaması ve yaygınlaşması ile beraber, beton üzerine yapılan teknik ve akademik çalışmalar da artmış ve yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, beton kalitesinin çimento miktarı kadar, su/çimento oranına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca beton kalitesinin tespit edilmesi için en etkin yolun, beton basınç dayanımını belirlemek olduğu ortaya konulmuştur [2]. Beton dökümü sırasında alınan standart numuneler, kalıptan çıkarıldıktan sonra nihai dayanımına kadar, küre maruz bırakılmakta ve sonrasında basınç testine tabi tutularak, basınç dayanımı belirlenmektedir. Bu test günümüzde de devam etmektedir. Ancak zaman geçtikçe betonun basınç dayanımının farklı şekillerde belirlenmesi ihtiyaçları ortaya çıkmıştır.

Betondan alınan numuneler teste tabi tutulduktan sonra, elde edilen sonuç üzerinde anlaşmazlıkların olması, mevcut yapıların yıllar sonra beton dayanımlarının tespit edilmesi talebi ve kalıp alma sürelerinin tespiti gibi nedenlerle, yerinde beton dayanımının tespiti araştırmacıların gündemine gelmiştir [3]. Karot alma yöntemi, betonun yerinde dayanımını tespit etmek için gündeme gelmiş ilk metottur. Bu metot; güvenilir ve yüksek doğruluğa sahiptir ancak yapı elemanına hasar verir, pratik ve ekonomik değildir [4]. Bu nedenle, özellikle 1940’lı yıllardan sonra yerinde beton dayanımının tespit edilmesi için farklı test ve cihazlar geliştirilmiştir [5].

Araştırmacılar karot alma gibi doğrudan basınç dayanımını belirleme yöntemi yerine dolaylı yoldan beton dayanımını belirleyebilecek yöntemler geliştirmeye başlamışlardır. Bu yöntemler, karot alma yöntemi gibi beton dayanımının tespitinde tek başlarına kullanılamasalar da karot numuneleri sayısını azaltmaları ve yaklaşık dayanım tespiti konusunda oldukça başarılı olmuşlardır. Bu yöntemler literatürde tahribatsız test

metotları olarak anılmaktadırlar. Bu yöntemlerden bazıları beton yüzeyine mini bir hasar verse de, yapı sistemi elemanının taşıyıcılığını etkilemediği için literatürde tahribatsız olarak isimlendirilmişlerdir [6].

Tahribatsız test metotları, betonun farklı özelliklerinden faydalanarak, beton basınç dayanımının tahmin edilmesini sağlar. Örneğin, beton test çekici yöntemi; yüzey sertliğinden, ultrases geçiş hızı yöntemi; beton boşluk oranından, penetrasyon metotları; sertlik ve batma direncinden faydalanarak, beton basınç dayanımını tahmin etmeye çalışır [7].

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 çoğu zaman büyük önem taşımaktadır. Çünkü imalat hızı, maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle kalıp alma sürelerinin kısa olması, zaman ve maliyet anlamında önemli kazançlar sağlamaktadır. Kalıp alma sürelerinin doğru tespit edilmesi, sistemin taşıyıcılığı ve güvenliği için çok çok önemlidir. Bu nedenle, betonun dayanım değerinin sürekli takip ediliyor olması gerekir. Bunu sağlamak, çok sayıda standart beton numune alarak mümkündür. Ancak çok sayıda numune almak, beraberinde iş gücü, zaman ve ekonomi problemlerini getirmektedir. Bu nedenle betonun dayanım kazanma hızının, tahribatsız test metotlarıyla tespiti, çok önemli avantajlara sahiptir [8,9].

Tahribatsız beton test yöntemlerinin her birinin farklı avantaj ve dezavantajları söz konusudur. Dezavantajlı yönlerinden dolayı, beton dayanımı 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 beraber kullanılmakta ve daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmeye çalışılmaktadır. Yapılan araştırmalar kombine metotların başarı oranlarının yüksek olduğunu göstermektedir [10].

Bu tez çalışmasında, yerinde beton dayanımını etkin bir şekilde belirleyebilecek, kombine bir metot geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amacın gerçekleştirilmesi için uygulama ve kontrol yeri olarak, Elazığ-Malatya illeri arasında yapımı devam etmekte olan Kömürhan Köprüsü seçilmiştir. Köprü ayağını oluşturan bölümlerin (pilonların) betonlarından sürekli olarak numune ve ölçümler alınarak, geliştirilen metot test edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, beton yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı, windsor prob penetrasyon ve olgunluk metotları kullanılmıştır. Kömürhan Köprüsü ayak betonları için dört farklı ve genel amaçlı bir kombine metot geliştirilmiştir. Geliştirilen metotların sonuçları ile standart beton numunelere ait dayanım sonuçları karşılaştırılmış ve aradaki hata oranları tespit edilmiştir. Daha sonra ise farklı karışım oranlarına sahip beton seriler üretilerek, uygulamada genel olarak kullanılabilecek bir kombine metot geliştirilmiştir.

Sonuç olarak, tahribatsız metotların çoklu kullanımı ile geliştirilen kombine metotların güvenilir, pratik ve ekonomik olduğu tespit edilmiştir. Özellikle hızlı inşa edilen önemli yapıların beton denetimlerinin ve dayanım kazanma hızlarının bu metotlarla yapılmasının önemli kazançlar sağlayacağı belirlenmiştir.

2. TAHRİBATSIZ BETON TEST METOTLARI

Tahribatsız test metotları, birçok yapı malzemesinin farklı özelliklerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Metaller kontrol edilirken, tahribatsız muayene, sürekli kullanılan ve tercih edilen bir uygulamadır. Örneğin, çelik imalatlardaki kaynak kontrolleri ve kontroller sonucu ortaya çıkan durumu tanımlamak için rutin olarak radyografik ve ultrases teknikler kullanılmaktadır ve bu yöntemler için yaygın olarak kullanılan ulusal ve uluslararası standartlar bulunmaktadır [11]. Tahribatsız muayene, parçanın veya sistemin işlevselliğini bozmadan incelenmesinin, test edilmesinin veya değerlendirilmesi sürecinin tamamı olarak tanımlanır [12]. Tahribatsız muayenenin amacı, malzemenin işlevlerini yerine getirme yeteneğini etkilemeden malzeme, bileşen, üretim veya montajların kalitesini ve bütünlüğünü belirlemektir [13].

Tahribatsız metotlar yardımıyla betonun dayanım, boşluk yapısı ve durabilite gibi birçok özelliği tespit edilmektedir [11]. Tahribatsız beton test metotlarının kesin bir başlangıç tarihi olmamasına rağmen, kullanımı eski yıllara dayanır. 1900'li yılların başlangıcından itibaren beton kullanımı giderek artmıştır. Bununla beraber beton dayanımının yerinde tespiti ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyacın karşılanması için karot numune alma tekniği geliştirilmiştir [14]. Bu yöntem, yüksek doğrulukta sonuçlar vermesine rağmen birçok farklı dezavantajlar içermesinden dolayı, araştırmacıları yeni yöntemler geliştirmeye sevk etmiştir. Bu çalışmalar sonucunda tahribatsız test metotları ile ilgili gelişmeler başlamıştır [11]. Betonu test etmek için tahribatsız yöntemlerin geliştirilmesiyle beraber bu yöntemler 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 az da olsa 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 problama radarı ve betondaki çatlakları ve boşlukları bulmak için kullanılan kızılötesi termografi teknikleridir. Her iki grup metot Şekil 1’de sunulmuştur.

Yerinde Betonun Tahribatsız Muayenesi			
Betonda Tahribatsız Muayenin Amacı			
DAYANIM	Beton Çatlakları		
	Beton Yüzeyinin Altındaki Katmanlar veya Boşluklar		
	Beton Tabakanın Kalınlığı		
	Betonun Geçirgenliği		
	Betondaki Donatının Korozyonu		
	Betonda Karbonasyon ve Klorür Penetrasyonu		
	Alkali Silika Reaksiyonu		
	Magnetik Metotlar		
	Elektrik Metotları		
	Radyoaktif Metotlar		
	Darbe Yankı Metodu		
	Radar Tarama Teknikleri		
	Akustik Emisyon yöntemleri		
	Nükleer Metotlar		
	Kızılötesi Termografi		
	Geçirgenlik Yöntemleri		
Dayanım Ölçümleri			
Dolaylı		Doğrudan	
Yüzey Sertliği Metodu		Ayrılma Yöntemi	
Penetrasyon Direnç Yöntemi		Çekme Dayanımı Yöntemi	
Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi			
Olgunluk Metodu			

Şekil 1. Beton için tahribatsız test metotları ve kullanım alanları.

Bu tez çalışmasında, beton basınç dayanımının yerinde tespit edilmesi için tahribatsız metotlar kullanılmıştır. Bu bölümde sadece bu tez çalışmasında kullanılan tahribatsız test yöntemleri ayrıntılı olarak sunulmuştur.

2.1. Yüzey Sertliği Metodu

2.1.1. Giriş

Bu metod, yüzey sertliği özelliğinden faydalanılarak, betonun basınç dayanımının tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Yerinde beton dayanımının tespit edilmesi ihtiyacı arttıkça, yüzey sertliği özelliğinden faydalanılarak beton dayanımının tespiti konusundaki araştırmalar artmıştır. Araştırmalar, yüzeyde oluşturulan “izin” belirlenmesi ve “geri tepme” ilkesine dayanan yöntemlerden oluşmaktadır [11].

İz oluşturma yöntemleri, iki temel adımdan oluşmaktadır. Önce, kinetik enerjiye sahip belirli bir kütle, beton yüzeyine bastırılarak iz oluşturulur. Daha sonra yüzeyde oluşturulan izin genişliği ve/veya derinliği ölçülerek, beton basınç dayanımı tespit edilmeye çalışılır. Geri tepme prensibine dayanan yöntemler ise yaylı bir çekicin beton yüzeyine çarpmasından sonraki geri tepme miktarının ölçülmesi prensibine dayanır.[11]

2.1.2. Tarihsel Gelişim

İz Oluşturma (Girinti) Metotları

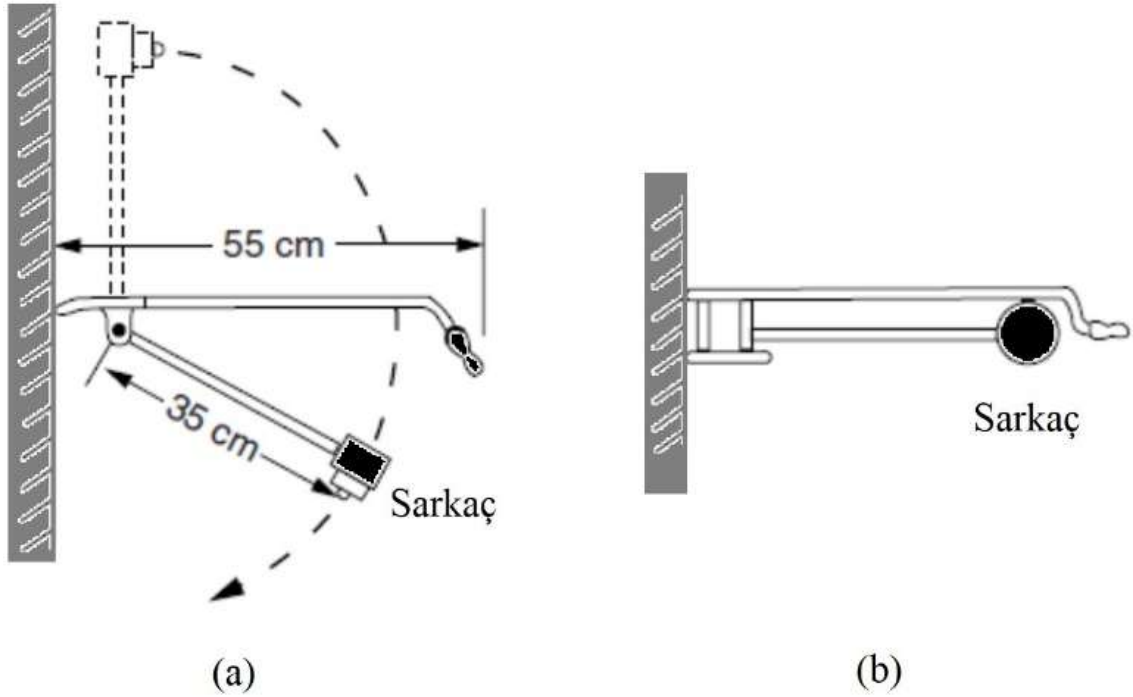
Bu yöntemlerin ilk kullanımlarına İngiltere ve Rusya’da rastlanmaktadır. Araştırmacılar, betonun basınç dayanımı ile yüzey sertliği arasında belirgin bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Bu araştırmacıların bir bölümü, betonun yüzey sertliğini, beton yüzeyinde oluşturdukları iz yardımıyla belirlemeye çalışmışlardır. Bu amaçla, geliştirdikleri aletler yardımıyla, beton numune yüzeyine kuvvet uygulamış ve yüzeyde iz oluşmasını sağlamışlardır. Bu izin genişlik ve/veya derinliği ölçülerek, iz özellikleri ile beton basınç dayanımı arasında bir korelasyon bulmuşlardır. Böylece yüzey izi özellikleri yardımıyla beton basınç dayanımını pratik bir şekilde tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu konuda literatürde yer alan en bilinen yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

I. Williams İz Tabancası: 1936’da Williams [15], basınç yardımıyla yüzeyde iz oluşturan bir alet geliştirmiştir. Alet bir top ve tabancaya benzeyen bir sistemden oluşmaktadır. Tabanca yardımıyla demir top beton yüzeye bastırılır ve yüzeyde oluşan izin derinliği bir mercekle yardımıyla ölçülür. Williams, bu metod yardımıyla yüzeydeki iz derinliği ile beton basınç dayanımı arasında ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

II. Frank İz Çekici: Frank tarafından geliştirilen cihaz, boru şeklinde bir çerçeveye yerleştirilmiş yay kontrollü bir mekanizmadan oluşur. Çekiç ucunda farklı

aplara sahip toplar kullanılmaktadır. Çekiç, test edilen yzeeye yerleştirilerek ve yay mekanizması sıkıştırılarak kuvvetin yzeeye etkimesi sağlanır. Genellikle birbirine yakın mesafelerde yaklaşık 20 darbe okuması yapılır ve sonuçların ortalaması bir test değeri olarak kabul edilir. İzin apı ve/veya derinliği ölçülür ve bu betonun basınç dayanımı ile arasında ilişki belirlenir. Yay mekanizması, 5 joule veya 1,25 joule bir enerji sağlamak üzere ayarlanabilmektedir [11].

III. Einbeck Sarkaç ekici: Einbeck tarafından geliştirilen sarkaç çekici şekil 2’de grlmektedir. Çekiç, 2.26 kg’lık bir kütleye sahip sarkaı olan bir kolu döndürülen yatay bacaktan oluşur. Yatay bacağın test edilecek beton yzeeye tutturulması ve sarkaçın betona çarpmasıyla oluşan izin ölçülmesiyle, beton basınç dayanımı tayin edilir. Sarkaın düşme yüksekliği, tam etki (180°) ile yarım darbeye (90°) kadar değişebilir. Yüzeyde oluşan iz çapı ve derinliği ölçülür ve bu değer betonun basınç dayanımıyla ilişkilendirilir. Bu eki için en büyük dezavantaj, yalnızca dikey yüzeylerde kullanılabilmektedir [11].



şekil 2. Einbeck sarkaç çekici şematik gösterimi.

Beton yüzey sertliği ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, ilk önce iz metotları yardımıyla tespit edilmiştir. Ancak bu metotların en önemli dezavantajı beton üzerindeki iz özelliklerinin (derinlik ve ap) yeterince ayırt edici olmamalarıdır. Bunlara

alternatif olarak, Ernst Schmidt tarafından beton test çekici geliştirilmiştir [11]. Bu yöntem, bölüm 2.1.3’de ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

2.1.3 Schmidt Beton Test Çekici Metodu

İsviçreli bir mühendis olan Ernst Schmidt 1948’de [16–18], ilk kez betonun sertliğini ölçmek için bir test çekici geliştirmiştir. Çalışmalarının sonuçlarını, çekiçlerin imal edildiği ve kapsamlı olarak test edildiği İsviçre Federal Malzeme Test ve Zürih Deneysel Enstitüsü’ne sunmuş ve Enstitü tarafından cihazın beton dayanımının yerinde tespiti konusunda uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu karardan sonra bu yöntemin ve cihazın yapı sektöründeki kullanımı giderek yaygınlaşmıştır.

2.1.3.1. Çalışma Prensibi

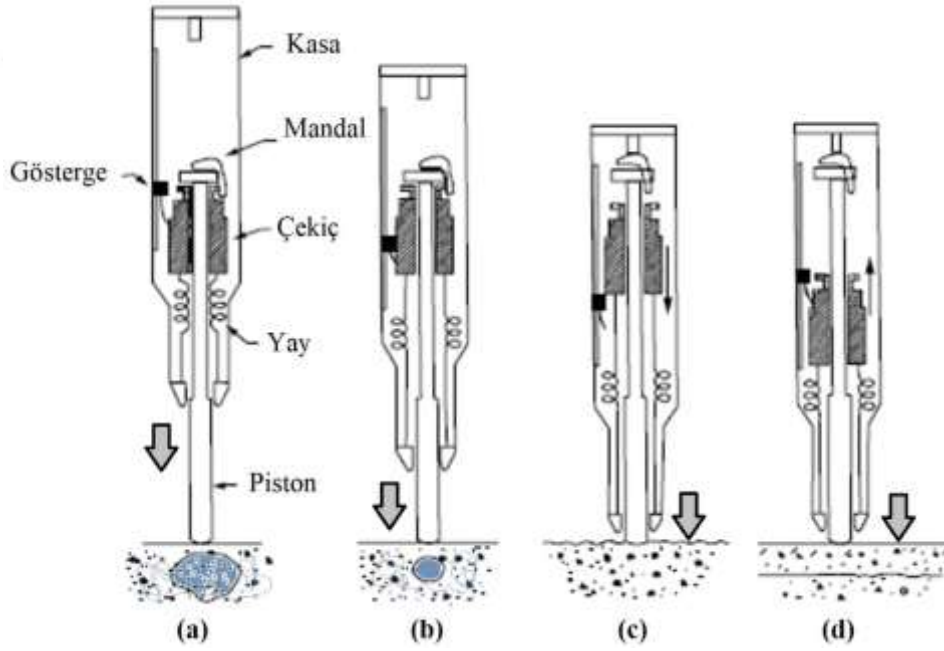
Schmidt test çekici esas olarak yüzey sertliğini belirleyen bir test cihazıdır, betonun dayanımı ile çekicinin içerisindeki yayın geri tepme sayısı arasında teorik bir ilişki bulunmaktadır. Schmidt beton test çekici, beton yüzeyine çarpan yay yüklü bir kütlenin geri tepmesini ölçer, beton sertleştikçe geri tepme de o kadar büyük olur. Dayanım özellikleri ile geri tepme sayısı arasında korelasyonlar oluşturularak yerinde beton dayanımı tespit edilir [16–18].

2.1.3.2. Tanım

Schmidt beton test çekici Şekil 3’de görülmektedir. Çekiç, yaklaşık 1,8 kg ağırlığındadır ve hem laboratuvarında hem de sahada kullanılmaya uygundur. Şekil 4’de, schmidt beton test çekicinin şematik kesit görünüşü sunulmuştur. Beton test çekicinin ana bileşenleri; dış gövde, piston, çekiç kütlesi ve yaydan oluşmaktadır. Diğer özellikler arasında, çekiç kütlesini piston çubuğuna kilitleyen bir mandal mekanizması ve çekiç kütlesinin geri tepmesini ölçmek için sürgülü bir gösterge bulunur. Geri tepme mesafesi, 10 ile 100 arasında işaretlenmiş bir ölçekte ölçülür. Geri tepme mesafesi, göstergede ibrenin konumuna göre bir "geri tepme numarası" olarak kaydedilir.



Şekil 3. Schmidt beton test çekici.



Şekil 4. Beton test çekicinin şematik görünümü: a) Yüzeye ilk temas, b) Çekice kuvvet uygulanması, c) Pistonun çekiç içerisinde tamamen girinceye kadar kuvvet uygulamasının devam etmesi, d) Yayın geri tepmesinin etkisi ile göstergede sertlik değerinin oluşması.

2.1.3.3. Test Metodu

Cihaz bir piston çubuğundan, içten yaylı çelik çekiç ve bir mandal mekanizmasından oluşur. Test için hazırlanan cihazın pistonu, betona doğru yavaş yavaş itilerek, piston kilitli konumundan serbest bırakılır. Bu, pistonun gövdeden uzaklaşmasına neden olur ve mandal, çekici piston çubuğuna bağlar. Piston, beton yüzeyine dik tutulur ve gövde beton yüzeyine doğru yavaşça itilir. Piston itildiğinde, çekiç gövdesini pistonla bağlayan yay gerilir. Piston beton yüzeye kadar itildiğinde, mandal otomatik olarak serbest kalır ve yayda depolanan enerji, çekiç gövdesini piston ucuna doğru iter. Çekiç gövdesi, piston çubuğunun durdurma parçasını ve geri tepmeleri etkiler. Geri tepme sırasında gösterge, çekiç gövdesi ile beraber hareket eder ve geri tepme mesafesini kaydeder (Şekil 4). Test çekicinin yanındaki düğme, pistonu, geri çekilmiş konumda kilitlemek için itilir ve geri tepme sayısı göstergenin içinden okunur [11].

Test, yatay-dikey, aşağı-yukarı veya herhangi bir ara açı ile yürütülebilir. Test açısı değiştikçe yerçekiminin geri tepme üzerindeki farklı etkileri nedeniyle geri tepme sayısı aynı beton için farklı olacak ve ayrı kalibrasyon veya düzeltme çizelgeleri gerektirecektir.

2.1.3.4. Test Prosedürü

Yüzey durumu: Test edilen noktadaki beton yüzeyi, düzgün, kuru ve gözeneksiz olmalıdır. Aksi halde, geri tepme okumaları düşük olacaktır ve mevcut durumdan daha düşük bir beton dayanımını elde edilir.

Test noktalarının yeri: Test edilecek beton yüzey veya numune en az 10 cm kalınlığında olmalıdır.

Test uygulama adımları: Beton küp numuneleri, sabit bir yük altında (7 N/mm^2) test cihazında sıkıştırılır. Yüzeyden 11 farklı ölçüm değeri alınır. Bu ölçümlerden elde edilen değerlerin en küçüğü ve en büyüğü ihmal edilir. Geri kalan dokuz değer aritmetik ortalaması alınarak test sonucu belirlenmiş olur [11].

2.1.3.5. Test Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Betonun basınç dayanımı ve geri tepme sayısı arasında bir korelasyon vardır. Ancak, literatürde yer alan çalışmalarda, beton yüzey sertliği özelliği kullanılarak elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına ait belirlilik katsayısı (R^2) değerleri 0,60-0,90 arasında

değişmektedir. Yani beton basınç dayanımındaki değişkenlik (varyasyon) %60~90'ının geri tepme sayısı (beton yüzey sertliği özelliği) ile açıklanabilmektedir. Buradaki %30 fark beton için büyük bir sapma anlamına gelmektedir. Dayanımlardaki bu büyük sapmaların önlenmesi için önceden bir korelasyon eğrisi geliştirilmesi tavsiye edilmektedir. Laboratuvar şartlarında uygun şekilde kalibre edilmiş bir beton test çekici ile standart koşullarda kür edilen ve nihai yaşa ulaştığında test edilen numunelerin beton basınç dayanımlarının tahmin doğruluğu $\pm\%10$ ile $\pm\%20$ arasında değişmektedir [19].

Carette ve Malhotra [20], test yaşları 1 ile 3 gün arasında olan beton numunelerinin, test sonuçları arası değişkenliklerinin ve kalıp alma sürelerinin belirlenmesi amacı ile betonun erken yaş dayanımını tespit etmişlerdir. Bu testler, 300 mm×1270 mm×1220 mm boyutlarındaki düz beton plakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu plakalardan alınan karot numuneler basınç dayanım testlerine tabi tutulmuşlardır. Karot numunelerden elde edilen beton basınç dayanım sonuçları ile beton test çekici ölçümlerinden elde edilen sonuçlar arasında uygun bir korelasyon bulunmuştur. Dolayısıyla, beton test çekici ile betonun erken yaş dayanımının da tespit edileceği ortaya çıkmaktadır.

Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları

1. Beton test çekici ile ölçüm yapılan taşıyıcı elemanların yüzeylerinde hasar kabul edilmeyen bir iz meydana gelir. Bu durum yapı elemanının taşıyıcılığını olumsuz herhangi bir etkiye bulunmamaktadır.
2. Karot alınamayan çok sık donatılı taşıyıcı yapı elemanlarının beton dayanımlarının tahmin edilmesine imkân sağlar.
3. Beton yüzey sertliği tespitinde kullanılan test çekici, başlangıç maliyeti düşük bir alettir. İşçilik ihmal edildiğinde uygulama maliyeti olmadığı söylenilebilir.
4. Çok sayıda test yapmak oldukça basit ve ekonomiktir. Test ekipmanı ile deneye başlanması için ön hazırlığa gerek yoktur.
5. Test ekipmanının kullanımı oldukça basit olup, kullanacak personel için özel bir eğitim gerektirmez.
6. Yerinde yapılacak testler için pratik, uygulanabilir ve etkindir.

Dezavantajları

1. Test sonuçları testin uygulandığı yüzeyin altındaki agrega boyutu, donatının varlığı ve betondaki karbonatlaşma gibi parametrelerden büyük oranda etkilenir.
2. Bu test metodu betondaki kusurların tespit edilmesinde kullanılmaz.
3. Test uygulanacak taşıyıcı yapı elemanının yüzeyinde sıva gibi bir kaplama bulunması durumunda bu kaplama kaldırılmadan test yapılması uygun değildir.

2.2. Penetrasyon Direnci Yöntemleri

Penetrasyon direnci yöntemleri, problemlerin (çelik çubukların veya pimlerin) betona batma derinliğinin ölçülmesi ilkesine dayanır. Bu batma derinliği miktarı, beton dayanımının bir ölçüsüdür. Penetrasyon direnci yöntemleri yardımıyla beton basınç dayanımının tahmini 1954'de Voellmy [21] tarafından başlatılmış ve iki teknik kullanılmıştır. Bu tekniklerden biri, Simbi olarak bilinen bir çekiç yardımıyla beton numune üzerinde delik açılır, açılan deliğin derinliği ile beton küplerin basınç dayanımları korele edilir. Diğer bir teknikte, beton problema işlemi metale pimlerle yapılır ve pimlerin batma derinliği ile betonun basınç dayanımı korele edilir.

1960'lı yıllarda, windsor prob test sistemi ABD'de geliştirilmiş ve tanıtılmış daha sonra ise onu 1980'lerde Kanada'da pin penetrasyon test yöntemi izlemiştir.

2.2.1. Prob Penetrasyon Test Sistemi

1964 ve 1966 yılları arasında, laboratuvar ve yerinde beton basınç dayanımını belirlemek için windsor prob olarak bilinen bir cihaz geliştirilmiştir [11]. Cihazın çalışma prensibi, betona batan problemlerin batma derinliği ölçülerek, beton basınç dayanımının tahmin edilmesi şeklindedir.

1972'de Klotz [22], windsor prob test metodunu, betonun yerinde basınç dayanımı ve beton kalitesini belirlemek için kullandığını belirtmiştir. Windsor prob test sistemi bugüne kadar, betonarme borularda, köprü ayak ve tabliyelerinde, yangından zarar görmüş betonları test etmek gibi birçok farklı amaçla kullanılmıştır. 1970'lerde, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde, beton yollarda sertleşmiş betonun yerinde test edilmesi için windsor prob metodunun yoğun olarak kullanıldığı bilinmektedir. [23–26].

2.2.1.1. Prensibleri

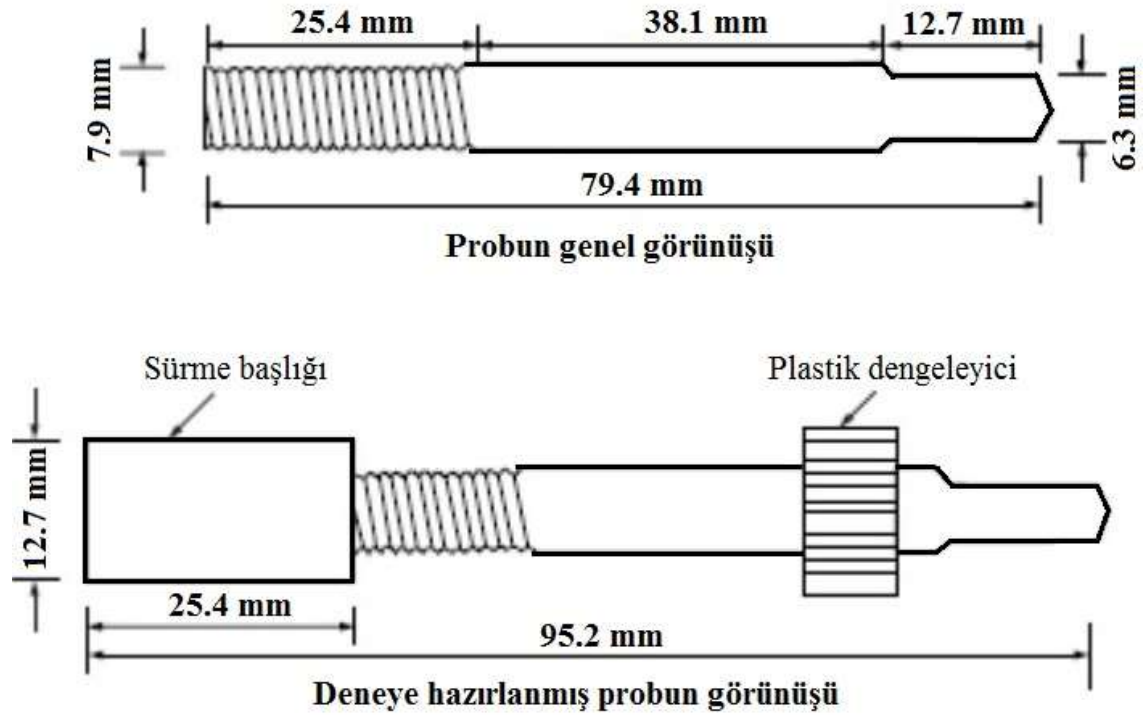
Windsor prob, beton test çekici gibi betonun yüzey sertliğini de dikkate alan bir test cihazıdır. Bu test sistemi, probun batma derinliğinin ölçülerek, beton basınç dayanımının belirlenmesi prensibine dayanır [27].

2.2.1.2. Çalışma Şekli

Windsor prob test sistemi; barutla harekete geçen, sertleştirilmiş alaşımlardan veya çelikten üretilen probların beton içerisine batması ve oluşan bu batma derinliğinin kumpas ile ölçülmesi esasına dayanır. Prob, uc çapı 6,3 mm, uzunluğu 79,5 mm olan konik bir malzemedir. Hafif betonların testi için uç çapı 7,9 mm olan problar kullanılmaktadır. Probun arka kısmı, dişli ve çapı 12,7 mm olan sürme başlığına yerleştirilir. Prob, 79,5 kg.m’lik bir enerjiyi üreten barutun ateşlenmesiyle beton yüzeyine batırılır. Daha düşük dayanımlı betonların testi için prob, windsor prob test aletinin içerisine 2,5” itilir. Böylece ateşleme mekanizmasının etkisi hafifletilerek, probun batma derinliği azaltılır.



Şekil 5. Windsor prob ekipmanının genel görünüşü.



Şekil 6. Test öncesi ve sonrası normal ağırlıktaki beton için prob görünümü.

2.2.1.3. Test Metodu

Test yönteminin uygulaması basit ve pratiktir. Test edilecek yüzey pürüzsüz olmalı, değilse bir süpürge aracılığıyla temizlenmelidir. Düz yüzeyler test edilecekse, 178 mm uzunluğundaki eşkenar üçgen plastik aparat ile uygun bir yerleştirme şablonu kullanılır ve üç prob her köşeden birer tane olmak üzere beton içine batırılır. Beton içerisine batırılan problemlerin batma derinlikleri derinlik ölçüm cihazı tarafından ölçülür [11].

2.2.1.4. Korelasyon İşlemleri

Windsor prob test sisteminde, probun batma derinliği ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmek için üretici tarafından geliştirilen tablo kullanılır. Bu tablolar, test sonuçlarında elde edilen batma derinliği ile betonun basınç dayanımı arasındaki ilişkilere dayanmaktadır [11]. Ancak, Gaynor [28], Arni [29], Malhotra [30–32] ve diğerleri [33,34] tarafından yürütülen araştırmalarda, üreticinin geliştirdiği tablolarının her zaman doğru sonuçlar vermediği ifade edilmiştir. Bazen betonun basınç dayanımını oldukça fazla, bazen de oldukça düşük tahmin ettikleri özellikle vurgulanmıştır [14,27]. Penetrasyon direnci metodu standartlaştırılmış olmasına rağmen, standart bir korelasyon kullanılmamaktadır [30,33].

2.2.1.5. Prob Penetrasyon Testinin Değerlendirilmesi

Yapılan prob penetrasyon testinin, detaylı teorik analizi mevcut değildir. Çünkü, probun batması sırasında oluşan dinamik gerilmelerin karmaşık kombinasyonlarından ve betonun heterojen doğasından dolayı teorik analiz yapılamamaktadır. Test sırasında absorbe edilen kinetik enerji, betonun parçalanması, kırılması, beton ve prob arasındaki sürtünme sonucu oluşan enerjiyi kapsar. Bu batma derinliğinde ortaya çıkan direnç, sadece deney malzemesinin bulunduğu bölgedeki dayanımı tahmin etmektedir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki bu deney için, agrega dayanımı betonun hasar durumunu önemli derecede etkilemektedir.

Prob penetrasyon testinin temel prensibi, prob batma derinliği ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Bu ilişkiyi etkileyen faktörlerden biri, iri agreganın sertliğidir ve bu sertlik, aletin üreticisi tarafından sağlanan tablolarda dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, daha önceden de belirtildiği gibi, üreticinin tablolarının kullanımı birkaç araştırmacı tarafından tatmin edici bulunmamaktadır. Bunun nedeni; agrega sertliğinden başka, prob batma derinliğini etkileyen diğer faktörlerin dikkate alınmamasıdır.

Prob batma derinliğini etkileyen en önemli etkinin, iri agreganın sertliği olduğu test cihazının üreticisi ve araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır [29]. Agrega sertliği yanında, kullanılan iri agrega tipi ve en büyük tane çapının prob batma derinliği üzerinde önemli etkilere sahip oldukları araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur [35]. Bununla birlikte; karışım oranları, nem içeriği, kür şartları ve yüzey koşulları gibi diğer parametreler de prob batma derinliği üzerinde çeşitli etkilere sahiptir [36].

Prob batma derinliği ile dayanım ilişkilerinin doğruluğunu etkileyebilecek diğer önemli parametreler arasında karbonatlaşma derecesi ve beton yaşı da bulunmaktadır [27,37]. Karbonatlaşma, betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini yüzeyin altındaki önemli bir derinlikte değiştirdiğinden probun penetrasyon derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir [37]. Öte yandan beton yaşının, bazı durumlarda dayanım tahmini doğruluğunu önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir [35]. Özellikle, beton yaşının çok fazla olduğu yapılarda, yapılan prob penetrasyon testlerinde, elde edilen sonuçlar gerçekte olduğundan daha yüksek dayanım değerleri gösterdiği görülmüştür. [38]. Benzer şekilde betonun gerilme geçmişi, prob penetrasyonu ve yerindeki dayanım arasındaki ilişkiyi etkileyen potansiyel bir faktör olarak tanımlanmıştır [39].

Beton basınç dayanımını tahmin etmek için prob penetrasyon testi kullanıldığında, test edilecek betonun türüne bağlı olarak yeni bir korelasyon eğrisi hazırlanması önerilir.

Genel olarak, prob penetrasyon testlerinin aynı numune serisi içerisindeki değişkenliği kısmen operatör ve ekipman hatalarına, kısmen de betonun heterojen yapısından dolayı oluştuğu kabul edilebilir. Birinci durumda, operatör hatalarının genel olarak daha az olduğu, değişikliğe neden olan sonuçların test ekipmanından kaynaklandığı belirlenmiştir. Örneğin, değişimler, probun beton içine batan kısmının uzunluğunun ölçülmesinde elde edilen hassaslık derecesine bağlı olabilir. Bu bağlamda, batan prob uzunluğunu ölçmek için daha doğru cihazların geliştirilmesinin, testlerdeki değişimleri muhtemelen azaltabileceği öne sürülmüştür [40]. Öte yandan prob test sonuçlarındaki değişimlerin harç matrisinde dağıtılan, iri agrega ve hava boşlukları gibi faktörlerin sonucu olarak ortaya çıkan betonun düzensiz yapısından kaynaklanmaktadır. Özellikle, testten etkilenen bölgesel alan üzerindeki iri agregaların rastgele dağılımdan dolayı betonun heterojenliği artmaktadır. Bu artış, prob penetrasyon testinin değişkenliğini etkilemektedir [41]. Daha önce belirtildiği gibi agrega sertliğinin probun batma derinliği üzerindeki etkisi genel olarak bilinmektedir [42,43].

Prob penetrasyon test sonuçlarının değişkenliği, test sonuçlarının yorumlanması için bir temel oluşturan, batma değerlerindeki değişim miktarıdır. [44]. Ayrıca, prob penetrasyon test sonuçlarının doğru bir şekilde yorumlanması için, penetrasyon okumalarının değişkenliğini ve korelasyon ilişkisinin belirsizliğini göz önüne alan istatistiksel prosedürlerin kullanılması gereklidir [45].

2.2.2. Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi (UPV)

Ultrases geçiş hızı yöntemi, 60 yılı aşkın bir süredir betonun kalitesini değerlendirmek için başarıyla kullanılmıştır. Bu yöntem, iç çatlama ve diğer kusurların yanı sıra, zararlı kimyasal ortamdan kaynaklanan, donma ve çözülme gibi betondaki değişikliklerin tespitinde de kullanılmaktadır.

Ultrases geçiş hızı yöntemi, beton numune üzerine gönderilen ultrases dalgalarının bir gönderme ve alma noktası arasında yayılması için geçen süreyi ölçerek beton basınç dayanımının tahmin edilmesini sağlar. Ultrases geçiş hızı yöntemi kullanılarak, beton numunelerin yerinde betonun dayanımını tahmin etmek mümkündür [11].

Ultras ses geçiş hızı yöntemiyle, bir malzemenin elastik özellikleri, önceden belirlenmiş korelasyonlar, bilinen modeller ve matematiksel ilişkiler kullanılarak belirlemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemle ayrıca ultras ses dalgalarının geçiş özellikleri gözlemlenerek malzemedeki kusurlarının ve hasar derecelerinin tespit edilmesi mümkündür [13].

Ultras ses geçiş hızı yönteminde, test edilen beton elemana zarar vermeyecek mekanik dalgalar kullanıldığı için gerçekten tahribatsız bir yöntemdir. Bir test numunesi, aynı şartlarda tekrar tekrar test edilebilir, bu da yapısal değişikliklere uzun süre dayanan betonun izlenmesi için önemli bir avantaj sunmaktadır.

2.2.2.1. Tarihsel Gelişim

Beton teknolojisi uzmanları, uzun yıllardır tahribatsız beton test metotlarını kullanarak, betonun özelliklerini belirlemişlerdir. 1930’lu yıllardan beri laboratuvar test numuneleri için ses dalgası ve titreşim tabanlı yöntemler kullanılarak, birçok test yöntemi önerilmiştir. Powers [46], Obert [47], Hornibrook [48] ve Thomson [49], rezonans frekansı yöntemi gibi titreşim tabanlı teknikleri kullanarak kapsamlı araştırma yapan ilk araştırmacılarıdır. II. Dünya Savaşı, ultras ses geçiş hızı yöntemi kullanılarak, yapı malzemelerinin tahribatsız testleri ile ilgili araştırmaları hızlandırmıştır. Ultras ses geçiş hızı yönteminin gelişimi, Kanada ve İngiltere’de aynı zamanda başlamıştır. Kanada’da Leslie ve Cheesman [50], “soniskop” adı verilen bir cihaz geliştirmişlerdir. İngiltere’de ise Jones [51], ultras ses test cihazı olarak adlandırılan bir cihaz geliştirmiştir. Prensi olarak hem soniskop hem de ultras ses test cihazı oldukça benzer özellikler taşımaktadır. 1960’lardan beri, ultras ses geçiş hızı yöntemi deneysel ortamlardan şantiyelere taşınmıştır [52]. Malhotra [27], bu konuda yayınlanan akademik çalışmaları kapsamlı bir şekilde incelemiş ve bu test metodunun gelişimini ayrıntıları ile açıklamıştır. Birçok lke, bu test metodu için standart prosedürleri benimsemiş ve standartlar oluşturmuştur.

2.2.2.2. Dalga Yayılım Teorisi

Katı bir ortamda oluşan ve ilerleyen mekanik dalga yayılımı üç grupta incelenir:

(1) Sıkışma dalgaları (aynı zamanda boyuna veya P dalgaları olarak da adlandırılır),

(2) Kayma dalgaları (enine veya S dalgaları olarak da adlandırılır),

(3) Yüzey dalgaları (Rayleigh dalgaları olarak da adlandırılır).

Sıkışma (P) dalgaları, katı ortam içinden yayılan ses dalgalarına benzer bir tarzda yayılır. Her dalga tipi, karakteristik bir hıza sahiptir ve bu karakteristik hız ile yayılır. Sıkışma (P) dalgaları belirli bir katı için, en yüksek hıza ve en düşük yüzey dalgalarına sahiptir. Betonda, kayma ve yüzey dalgalarının hızları, tipik olarak, sıkışma (P) dalga hızının sırasıyla %60 ve %55'i kadardır [53]. Bir dalganın hızı, ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır. Elastik, homojen katı ortam için sıkışma dalga hızı *Denklem 1* yardımıyla hesaplanmaktadır;

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \quad (1)$$

Burada;

$V = P$ dalga hızı,

$K = (1 - \mu)/((1 + \mu)(1 - 2\mu))$

E = Dinamik elastisite modülü,

ρ = Yoğunluk,

μ = Poisson oranı,

K değeri oldukça dar bir aralıkta değişir. Örneğin μ , 0,15 ile 0,25 (%67 artış) arttığında, ilgili K değeri 1,06 ile 1,20 (%12 artış) artar. Böylece, E ve ρ 'da ki değişimler, V üzerindeki değişimlerde daha önemli bir etkiye sahiptir. Beton için, V hızı tipik olarak 3000 ile 5000 m/s arasında değişir.

Frekans, hertz birimlerinde (saniyede meydana gelen devir sayısı) veya mesafe biriminde meydana gelen dalga boyu olarak bilinir. Belirli bir ortamda, dalga frekansındaki bir artış dalga boyunda düşüşü belirler ve bunun tersi de geçerlidir. Yayılan bir dalganın hızı, farklı malzeme özelliklerine sahip bir ortama veya bir ara yüze çarptığında, dalga enerjisinin bir kısmı, orijinal dalga yolundan uzağa dağılır. Örneğin, betondaki boşluklar, çatlaklar ve agrega parçacıkları, P dalga hızının başlangıç enerjisinin bir kısmının orijinal dalga yolundan uzağa dağılmasına neden olur. [54]. Beton için, kullanılabilir frekansın üst sınırı yaklaşık 500 kHz'dir, çünkü ilgili dalga boyu yaklaşık 10 mm'dir, bu da iri agrega parçacıklarının boyut aralığındadır. Sonuç

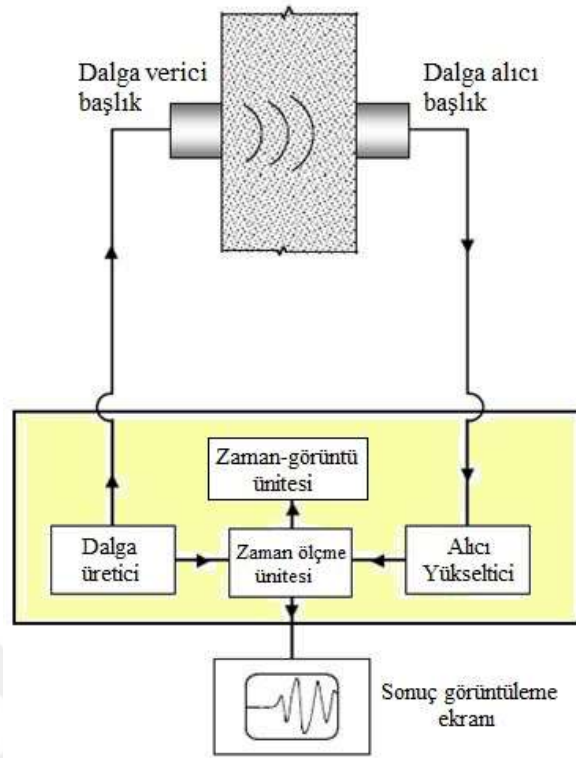
olarak, dalga hızı tamamen dağılmadan önce kat edilebilen yol uzunluğu sadece birkaç santimetredir. Daha büyük yol uzunlukları, daha düşük frekanslar (böylece daha büyük dalga boyları) kullanılarak elde edilebilir. Örneğin 20 kHz'lik bir frekans genellikle kalınlığı 10 metreye kadar olan betonu geçebilir [54].

Ultrases geçiş hızı test yönteminde, test numunesinin yüzeyindeki bir noktadan diğer bir noktaya dalga hızları gönderilir ve geçiş süresi ölçülür. İki nokta arasındaki mesafe biliniyorsa, dalganın hızı belirlenebilir. Ultrases geçiş hızı test ekipmanları kullanılarak geçiş süreleri belirlenir. Çoğu test konfigürasyonunda bu en hızlı dalga olduğu için direkt sıkışma (*P*) dalgası olarak adlandırılmaktadır.

2.2.2.3. Ultrases Geçiş Hızı Test Cihazı

Ultrases geçiş hızı test cihazı, test betonu için ses dalgası üreten, gönderen (darbe üretici ve verici) ve betondan geçmesi için gereken süreyi ölçen bir araçtan oluşur. Cihaz, gönderilen dalganın yapısını gözlemlemek için bir salınım ölçer veya başka bir görüntü aygıtına da bağlanabilir. Şematik bir diyagram Şekil 7'de gösterilmiştir. [55].

Ultrases geçiş hızı test cihazı, dünya genelinde birçok ülkede üretilmektedir (Şekil 8). Test cihazı, taşınabilir, kullanımı kolay ve şarj edilebilir bir batarya ve şarj ünitesi içermektedir. Genel olarak 6500 μ s kadar dalga süreleri 0,1 μ s çözünürlük ile ölçülebilir. Ölçülen dalga süreleri belirgin bir şekilde görüntülenir. Ultrases geçiş hızı test cihazı, ultrases dalgasını iletmek ve almak için birer adet iki güç çevirici içerir. Betonu test etmek için genellikle 25 ile 100 kHz frekanslı güç çeviriciler kullanılır. Özel uygulamalar için farklı rezonans frekanslarına sahip güç çevirici setleri mevcuttur. Yüksek frekanslı güç çeviriciler (100 kHz üzeri) küçük boyutlu numuneler, daha kısa yol uzunlukları veya yüksek dayanımlı betonlar için kullanılırken, düşük frekanslı güç çeviriciler (25 kHz'nin altında) daha büyük numuneler ve daha uzun yol uzunlukları veya iri agregalar kullanılarak oluşturulan betonlar için kullanılır. Yaygın olarak kullanılan bir cihaz Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Ultrases geçiş hızı test sisteminin şematik diyagramı.



Şekil 8. Ultrases geçiş hızı test cihazı.

2.2.2.4. Ultrases Geçiş Hızı Yöntemi:

Ultrases geçiş hızı yönteminin temel fikri, *Denklem 2*'de gösterildiği gibi, bir ortamdaki sıkışma (P) dalgalarının atım hızının, ortamın elastik özelliklerine ve yoğunluğuna bağlıdır.

Ultrases geçiş hızı cihazının dalga üreten başlığı bir dalgayı betona iletir ve dalga alıcı başlığı, dalgayı betondan başka bir noktada alır. Ultrases geçiş hızı cihazı göstergesinde ki Δt ; sıkışma (P) dalganın beton numuneden geçiş süresini gösterir. Bu nedenle, sıkışma (P) dalga hızı V , aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

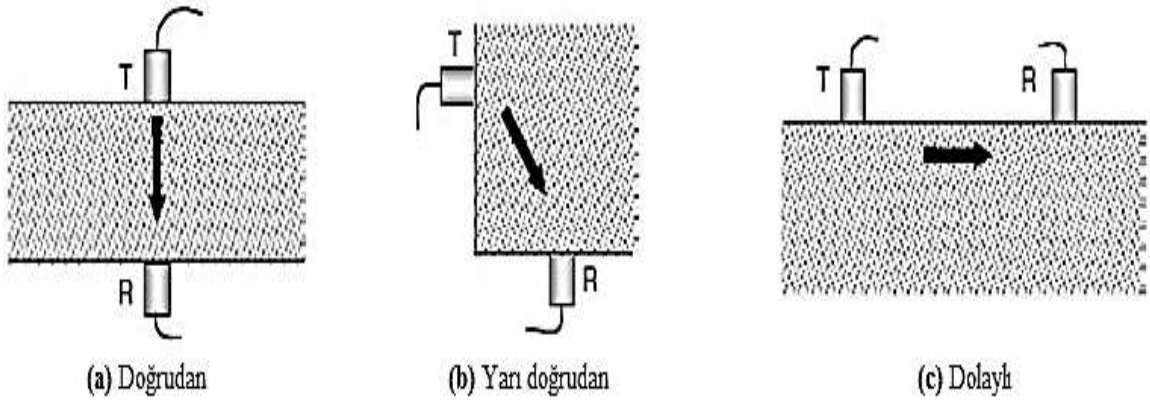
Betondan geçen sıkışma (P) dalgası, çeşitli agrega-harç sınırlarında yayılmaya maruz kalır. Dalgalar alıcı başlığa ulaştığında, sıkışma (P) dalgaları ve S dalgalarını içeren karmaşık bir dalga biçimine dönüşür. Alıcıya, en hızlı hareket eden sıkışma (P) dalgaları ulaşır.

Oluşturulan dalgayı iletmek veya almak için, güç çeviriciler numune ile tam temas halinde olmalıdır, aksi halde numune ile güç çevirici arasında bir hava boşluğu oluşur. Bunun sonucunda hatalar meydana gelebilir. Piyasada bulunan birçok temas maddesi, hava boşluklarını ortadan kaldırmak ve iyi teması sağlamak için kullanılabilir. Bunlar gres, sıvı sabun ve kaolin-gliserol pastası gibi malzemelerdir. Sürülen temas tabakası olabildiğince ince olmalıdır. Güç çeviriciler üzerinde sabit basınç uygulanırken, belirli bir konumda tekrarlanan okumalar, en az bir geçiş süresi değeri elde edilene kadar alınmalıdır.

Beton yüzeyi çok sert ise yoğunlaştırıcı olarak kalın bir yağ tabakası kullanılmalıdır. Bazı durumlarda, pürüzlü yüzeyin pürüzsüz hale getirilmesi gerekebilir bunun için alçı, çabuk sertleşen çimento hamuru veya çabuk kuruyan epoksi harcı ile düzgün bir yüzey oluşturulmalıdır. Geçiş hızı testine devam etmeden önce tesviye macunu hazırlanmalıdır. Çok kaba yüzeylerde, örneğin, yüzey harcının yangın veya yanma etkisinden dolayı hasar gördüğü yerlerdeki dalgayı almak için 6 mm uç çapı olan bir alıcı başlığı kullanılabilir.

Normal beton için geçiş hızı genellikle 3700 ile 4200 m/s arasındadır. Bu nedenle, 300 mm yol uzunluğu için, geçiş süresi yaklaşık 70-85 μ s değerleri arasındadır. Cihazın

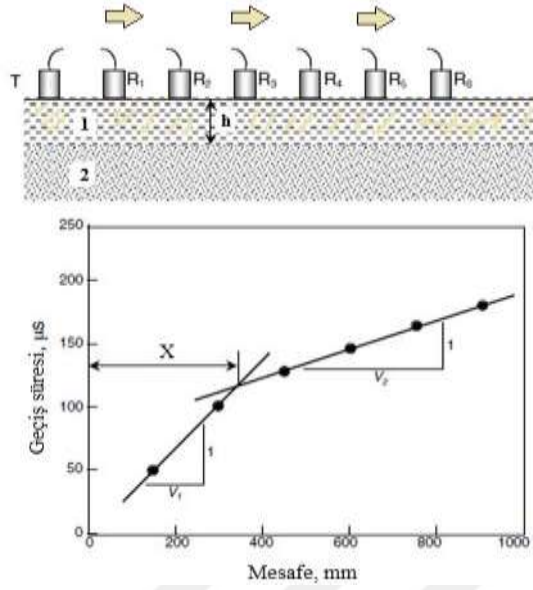
böyle kısa bir geçiş süresini ölçmek için hassas olması gerekmektedir. Yol uzunluğu da dikkatlice ölçülmelidir. Geçiş hızı metodu bir dalga yayılımı tekniği olduğundan, test edilen elemandaki en küçük dalga hareketi bile oluşturacak herhangi bir kaynak (örneğin, schmidt beton test çekici gibi) test süresince çalıştırılmamalıdır. Şekil 9’da gösterildiği gibi, dalga başlıklarının ayarlanabileceği üç farklı durum vardır: (1) Doğrudan iletim; (2) Yarı doğrudan iletim; (3) Dolaylı veya yüzeysel iletim. Doğrudan iletim yöntemi, Şekil 9a, en çok tavsiye edilen ve en etkili ölçüm şeklidir. Çünkü bu ölçüm şekli ile dalganın maksimum enerjisi iletilir ve/veya alınır.



T: Verici, R: Alıcı

Şekil 9. Ultrases geçiş hızı ölçüm şekilleri; (a) doğrudan yöntem, (b) yarı iletim yöntemi, (c) dolaylı yüzey yöntemi.

Şekil 9b’de gösterilen yarı doğrudan iletim yöntemi; yine etkili bir şekilde kullanılabilir. Ancak, başlıkların çok uzak olmamalarına dikkat edilmelidir, aksi halde iletilen dalga zayıflayabilir ve dalga sinyali tespit edilemeyebilir. Dolaylı ya da yüzeysel iletim yöntemi de gerektiğinde kullanılabilir (Şekil 9c). Alınan sinyalin genliği, doğrudan iletim yöntemi tarafından elde edilenden daha düşüktür. Bu yöntemde hata yapma oranı daha yüksektir ve dalga hızını belirlemek için özel bir yöntem gerekebilir [56]. Öncelikle, verici başlıkların yeri sabittir, alıcının konumu bir hat boyunca sabit artışlarla değiştirilir ve bir dizi geçiş süresi okuması alınır. İki güç çevirici arasındaki aralık “x ekseninde” ve buna karşılık gelen dalga geçiş süresi “y ekseninde” gösterilir (Şekil 10). Şekil 10’da verilen eğrilerin eğimi dalga hızını belirlemekte kullanılır.



Şekil 10. Tabaka derinliğini (h) belirlemek için yüzey yönteminin kullanılması.

Bu yüzey metodu kullanıldığında, başlık tarafından üretilen dalga, beton yüzeyine yakın olarak yayılır. Beton yüzeyindeki bileşim ile daha alt tabakadaki beton bileşimleri farklılık gösterebilir. Örneğin; bir döşeme betonunda yüzeye yakın beton, alt kısmındaki betondan daha yüksek miktarlarda ince malzemeye sahip olabilir. Böylece, yüzey iletim yöntemi ile ölçülen hızlar, tipik olarak doğrudan iletim ile ölçülenlerden daha düşüktür. Bununla birlikte, bu davranış, farklı kalitedeki bir malzemeden bir tabakanın kalınlığını tespit etmek ve tahmin etmek için kullanılabilir. Uygun olmayan inşaat uygulamaları (örneğin, yetersiz vibrasyon, betonun yetersiz kürü, beton dökümü sırasında oluşan gecikmelerden dolayı oluşan soğuk derzler, yanlış yerleştirme), dış etkilerden kaynaklanan hasarlar (donma ve çözülme, sülfat etkisi ve korozyon) ve yangından kaynaklanan hasarlar nedeniyle daha düşük kalitede beton yüzeyi oluşabilir. Yüzey kalınlığı, yüzey iletim prosedürü kullanılarak tahmin edilebilir. İki başlık birbirine yakın olduğunda dalga betonun üst tabakasından geçerek en hızlı hareket yolunu oluşturur. Başlıklar birbirlerinden uzaklaştıkça dalga için en hızlı hareket yolu, her iki tabaka arasındaki kalınlık kadardır. Üst tabaka (V_1) ve alt tabaka (V_2) arasındaki geçiş hızı, iki farklı eğim ile çizilmiştir (Şekil 10). Bu eğimlerdeki değişimlerden oluşan Şekil 10'da ki x mesafesi ölçülür ve üst tabakanın h , kalınlığı aşağıdaki denklemden bulunur [45]:

$$h = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (3)$$

Yöntem, alt tabakanın düzgün bir kalınlıkta ve farklı bir tabaka oluşturduğu geniş yüzey alanları için geçerlidir. Hasar görmüş veya petek petek olmuş betonun, bölgesel alanlarını test etmek oldukça zordur, ancak hem doğrudan iletim hem de yüzey yayılımı ölçümleri yapılmışsa, bu tür bölgesel alanlardaki malzemenin yaklaşık kalınlığını elde etmek mümkündür. Benedetti, yangından tahrip olmuş betonun elastik modülün belirlenmesi için geçiş hızı ölçümlerinin yorumlanması amacıyla etkin bir model önermiştir [57].

2.2.2.5. Geçiş Hızını Etkileyen Faktörler

Geçiş hızı testi yapmak kolay olsa da betonun özelliklerinden dolayı geçiş hızı okumalarının doğruluğunu artırabilmek için geçiş hızı ölçümleri tekrarlanabilir. Geçiş hızını etkileyen faktörler; doğrudan beton özelliklerinden kaynaklanan ve diğer faktörler olarak iki kategoriye ayrılabilir:

1. Beton Özelliklerinin Etkileri:

Agrega Boyutu, Granülometri, Agregası Tipi ve Miktarı: Birçok araştırmacı, geçiş hızının, agrega tipi ve miktarına göre önemli ölçüde etkilendiğini tespit etmiştir [14,58]. Genel olarak, çimento hamurundaki geçiş hızı agreganınkinden daha düşüktür [62]. Jones [61], aynı beton karışımında ve aynı basınç dayanımı seviyesinde, doğal agregalı betonun en düşük geçiş hızına sahip olduğunu, kırmataş kalkerin en yüksek geçiş hızıyla sonuçlandığını ve kırmataş granitin ise bu ikisi arasında bir hız verdiğini vurgulamıştır. Jones [54], Bullock ve Whitehurst [58] ve Kaplan [63] tarafından elde edilen test sonuçları, aynı basınç dayanımı düzeyinde, daha yüksek agrega içeriğine sahip betonun daha yüksek bir geçiş hızı verdiğini göstermektedir. Belirli bir geçiş hızı değeri için, agrega/çimento oranı ne kadar yüksek ise basınç dayanımı o kadar düşük olmaktadır [54].

Çimento Tipi: Çimento tipi, geçiş hızı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip değildir. Hidratasyon oranı, bir çimentodan diğer çimentoya göre farklılık gösterir ve bu da geçiş hızını etkiler. Hidratasyon ısı arttıkça, elastisite modülü de geçiş hızı gibi artar [64].

Su/Çimento Oranı: Kaplan [63], su/çimento (s/c) oranının geçiş hızı üzerindeki etkisini incelemiştir. (s/c) oranı arttıkça, betonun bileşiminde başka hiçbir değişiklik

olmadığı varsayılarak, basınç ve eğilme dayanımlarının ve bunlara karşılık gelen geçiş hızının azaldığını tespit etmiştir.

Katkılar: Hava sürükleyici katkıların, geçiş hızı ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi etkilemediği görülmüştür [61].

Betonun Yaşı: Betonun yaşı ilerledikçe beton basınç dayanımı artmakta ve geçiş hızı süresi buna karşılık olarak azalmaktadır. Jones [61], geçiş hızı ile beton yaşı arasındaki ilişkiyi tanımlamıştır. Hızın başlangıçta çok hızlı arttığını ancak kısa sürede sabit olarak devam ettiğini göstermiştir. Bu eğilim, belirli bir beton türü için basınç dayanımı-yaş eğrisine benzerdir, ancak geçiş hızı, basınç dayanımından daha kısa bir sürede sınır değerine ulaşır. Ayrıca, geçiş hızı eğrisinin sabit olarak devam ettiği durumlarda deney hataları oluşur.

Diğer Etkiler:

Başlıkların Teması: Eğer iyi bir temas elde etmek için yeterli özen gösterilmezse (örneğin, başlıklara uygulanan basınç), yanlış bir dalga hızı okumasına neden olabilir.

Betonun Sıcaklığı: 5 ile 30 °C arasındaki sıcaklık değişimlerinin geçiş hızı üzerinde bir etkisi olmadığı araştırmalarda ifade edilmektedir [65].

Betonun Rutubet ve Kür Durumu: Nem, genellikle düşük dayanımlı betona göre; yüksek dayanımlı betonda, gözeneklilik farklılıklarından dolayı dalga hızı üzerinde daha az etkiye sahiptir. Yüksek (s/c) oranına sahip kuru beton, sertleştiğinde dalga hızının %4-5 oranında artması beklenebilir [54]. Kaplan [66], laboratuvar şartlarında kür edilen numuneler için dalga hızının, uygulamadaki sertleşmiş beton örneklerinden daha yüksek olduğunu saptamıştır. Aynı betonla dökülen kolonlardaki dalga hızının, saha ve laboratuvar şartlarında sertleşen beton numunelerinden daha düşük olduğunu da özellikle belirtmiştir.

Dalga Yolu Uzunluğu: Teorik olarak, dalganın hareket ettiği yol uzunluğu ve dalganın frekansı, (başlık frekansı ile aynıdır) geçiş süresini etkilememelidir. Bununla birlikte, pratikte, daha küçük yol uzunlukları, betonun homojen olmayan yapısı nedeniyle daha değişken ve biraz daha yüksek geçiş hızı elde edilmektedir.

RILEM [67] aşağıdaki minimum yol uzunluklarını (numune genişliklerini) önermektedir,

1. Maksimum agrega boyutu 30 mm olan beton için 100 mm
2. Maksimum agrega boyutu 45 mm olan beton için 150 mm

Numunenin Şekli ve Boyutları: Çoğu durumda geçiş hızı, numunenin şekline ve büyüklüğüne bağlı değildir. Ancak, *Denklem 1* sonsuz ölçüye sahip bir ortam için geçerlidir. Bu gereksinim, numunenin en küçük boyutunun dalga uzunluğundan daha büyük olmasını gerektirmektedir Yaklaşık 3700 m/s’lik bir geçiş hızına ve 54 kHz’lik bir başlık frekansına sahip olan beton için, dalga boyu yaklaşık 68 mm’dir. Bu nedenle, bu betondan yapılan bir numune, 54 kHz’lik bir frekansa sahip bir başlık ile test edildiğinde, en az 70 mm’lik bir uzunluğa sahip olmalıdır. Bu numunenin en küçük yanal boyutu 70 mm’den az ise *Denklem 1*, özellikle uzun yol uzunlukları için doğru bir ilişki kuramayabilir. Bu gibi durumlarda, daha yüksek frekanslı bir başlığın kullanılması tavsiye edilir, böylece dalga boyu ve buna karşılık gelen en küçük boyut gereksinimi azaltılır.

Gerilme Düzeyi: Geçiş hızı, genellikle test edilen elemandaki gerilme düzeyinden etkilenmez. Bununla birlikte, beton çok yüksek seviyede statik veya tekrarlı gerilmeye maruz kaldığında, örneğin; nihai gücün %65’i veya daha fazlası gibi, bu tip durumlarda beton içinde mikro çatlakların geliştiği ve bunun da geçiş hızını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür [68,69].

Donatının Varlığı: Betonun geçiş hızını etkileyen en önemli faktörlerden biri beton içerisinde bulunan donatının varlığıdır. Donatılı betondaki geçiş hızı, donatısız betondaki geçiş hızının 1,4 ile 1,7 katıdır. Bu nedenle, donatı çevresinde ki geçiş hızı okumaları genellikle donatısız betona göre daha yüksektir. Mümkün olduğu kadar, geçiş hızı ölçülecek yüzeylerde donatının bulunmamasına dikkat edilmeli ve test okumaları bu yüzeylerde yapılmalıdır. Test okumalarının yapıldığı yüzeylerde donatı bulunuyorsa düzeltme faktörleri kullanılmalıdır. Bu durumda kullanılacak düzeltme faktörleri RILEM [67] ve İngiliz Standartları [70] tarafından önerilmektedir. Chung yaptığı çalışmalarda [71,72], düzeltme faktörleri ile donatı çapları arasında bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Bungey çalışmasında [73] donatı çaplarını da içeren düzeltme faktörleri önermiştir. Bununla birlikte, yoğun donatının bulunduğu (çok kuvvetlendirilmiş) elemanlarda, betonun geçiş hızının doğru ölçülmesinin mümkün olamayacağı belirtilmiştir.

Geçiş Hızı Yönteminin Standardizasyonu: Birçok ülke geçiş hızını ölçmek için standart prosedürler geliştirmiştir. 1960’ların sonlarında Amerika Birleşik Devletleri’nde, ASTM Komitesi C09, geçiş hızı için bir standart çalışması başlatmıştır.

1968 yılında geçici bir standart yayımlanmıştır. 1971’de standart bir test yöntemi yayımlanmış ve o zamandan beri standartta önemli bir değişiklik olmamıştır [55].

Bu test metodu, betonun nihai kalitesini değerlendirmek, boşluklar ve çatlakların varlığını göstermek, çatlak onarımlarının etkinliğini değerlendirmek için geçerlidir. Ayrıca, betonun özelliklerindeki değişiklikleri belirlemek ve yapıların incelenmesinde bozulma veya çatlama şiddetini tahmin etmek için de geçerlidir. Zaman içinde durum değişikliklerinden emin olmak için yapı üzerinde test konumları işaretlenmeli, testler aynı konumda tekrarlanmalıdır.

Ölçümün doğruluğu aleti kullanan operatörün, başlık ile malzeme arasındaki mesafeyi tam olarak sağlama kabiliyetine bağlıdır. Alınan sinyal gücü ve ölçülen geçiş süresi, başlıkların beton yüzeylere bağlanmasından etkilenir. Başlıklarda kararlı geçiş sürelerini sağlamak için yeterli yardımcı bağlantı elemanı ve basınç uygulanmalıdır. Aynı zamanda alınan sinyalin gücü, hareket yolu uzunluğundan, test edilen betonda çatlak veya bozulmanın mevcudiyeti ve derecesine göre de etkilenmektedir.

Uygun bağlantı, alınan dalga şeklini ve büyüklüğünü görüntüleyerek doğrulanabilir. Dalganın şekli, sinüzoidal bir harekete sahip olmalıdır. Şekil, cihazın içinde bulunan osiloskop veya sayısallaştırılmış ekranda çıktılar aracılığıyla görüntülenebilir. Bu test yöntemi yani sadece dalganın grafik şekli kullanılarak, dayanım belirlemek veya yerinde imal edilen betonunun elastisite modülünün, tasarımda kabul edilen ile uyumluluğunu belirlemek için yeterli değildir.

Koşullar izin verdiğinde, bir beton numunesi üzerinde geçiş hızı ve basınç dayanımı (veya elastisite modülü) belirlenerek bir hız-dayanım ilişkisi kurulabilir. Bu ilişki, beton üzerinde daha fazla dalga-hız testleri ile dayanım tahmini için kullanılabilir. Prosedür, mevcut dalga üreten kaynakların sınırlamaları dahilinde, numunenin büyüklüğüne veya şekline bakılmaksızın hem yerinde imal edilen hem de laboratuvar şartlarında üretilen beton testlerinde uygulanabilir. Donatılı betondaki geçiş hızı iki katına çıkabileceğinden, donatının yakınında ölçülen geçiş hızı aynı bileşime sahip donatısız betona göre daha yüksek olacaktır. Mümkünse, dalganın yayılma yönüne paralel olarak, donatıya yakın ölçümlerden kaçınmak gerekir.

2.2.2.6. Uygulamalar

Geçiş hızı yöntemi, laboratuvarda olduğu kadar sahada da başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [74,75]. Ayrıca, kalite kontrol ve bozulma analizi için etkili bir şekilde kullanılmaktadır.

Beton Dayanımının Tahmini: Ultrases geçiş hızı metodu, dayanım ile hız arasında fiziksel bir ilişki olmamasına rağmen hem sahada hem de laboratuvarda betonun dayanımını tahmin etmek için kullanılabilir. Dayanım ve geçiş hızı arasındaki ilişki betonu oluşturan birçok özelliğe bağlı olarak değişir. Bunlar; agrega boyutu, tipi ve içeriği, çimento tipi ve içeriği, su/çimento oranı ve nem içeriği gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir. Bu faktörlerin etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [59,60]. İncelenen betonun türü için daha önce benzer korelasyonlar kullanılmadıkça, betonun geçiş hızı değerlerinden dayanımı tahmin etmenin mümkün olamayacağı belirtilmiştir [63,66]. RILEM [67], İngiliz Standardı [70] ve Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) [76], geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi geliştirmek için çeşitli önerilerde bulunmaktadır. Bu sayede geçiş hızı verilerinden yararlanılarak dayanım tahmin edilir.

Betonun Homojenliğinin Tespiti: Geçiş hızı yöntemi betonun homojenliği yani betonun kalitesinin göreceli olarak değerlendirilmesi için uygundur. Heterojenlik, iç çatlama, bozulma, beton yüzeyinin ayrışması ve karışım oranlarındaki farklılıklar olarak tanımlanır. Beton elemandaki heterojenlikler, geçiş hızında değişikliklere neden olur. Örneğin dalganın, iç hava boşluğu etrafındaki kırınımı, boşluk merkezi boyunca varsayılan bir yol için geçiş süresinde bir artışa neden olacaktır. Böylece, görünen hız azalır. Bununla birlikte, başlık yüzeyinden daha büyük olan boşluklar, hızda azalmaya neden olacaktır [54]. Ayrıca sahadaki betonun dayanımı, malzeme kökenindeki değişimler nedeniyle homojen karışım elde edilememesinden dolayı değişmektedir. Geçiş hızı yöntemi, karşılaştırmalı veriler oluşturmak ve betonun nitelik yönünden değerlendirilmesi için oldukça etkilidir. Bu verilerin elde edilmesi için, bir ölçüm noktaları sistemi, yani bir ızgara modeli (tarama alanı) oluşturulabilir. Değerlendirilecek yapının büyüklüğü, beklenen değişkenlik ve gereken hassasiyet için 300 mm aralıklı veya daha büyük bir tarama alanı oluşturulmalıdır. Genellikle, test edilen elemanın kalınlığına bağlı olarak, yaklaşık 1 m mesafe yeterli olabilir. Sahada veya test numunesi üzerinde betonun bu niteliksel karşılaştırmasının diğer uygulamaları şunlardır, (1)

Betonun yerleşme ve sıkışmasının etkinliğini değerlendirmek için betonun yoğunluğunu kontrol etmek, (2) Betonda ayrışma olmuş bölgeleri bulmak için, (3) İç çatlakları ve boşlukların yerlerini belirlemek için kullanılır.

Araştırmacılar, çeşitli yapılarda betonun homojenliğini belirlemek için farklı çalışmalar yapmışlardır [61,77–79]. Mevcut yapılar üzerinde gerçekleştirilen bu tür araştırmaların önemli bir çoğunluğu, 1953'te Parker [77] tarafından ortaya konulmuştur. Parker tarafından yapılan araştırma 1914 yılında inşa edilmiş bir baraj üzerinde yapılmıştır. Çoğunluğu 300 mm aralıklarla, toplam 50.000 okuma alınmıştır. Yapı üzerinde ölçülen geçiş hızları 1525 ile 5185 m/s arasında değişmiştir. Bu değerler gelişmiş bozulma alanlarını belirlemek için başarı ile kullanılmıştır. Rhazi ve arkadaşları ise [80], 1940 yıllarında inşa edilen bir beton ağırlık istinat duvarı içindeki anormallikleri haritalamak için ultrases geçiş hızı verilerini kullanmışlardır. Aynı şekilde Olson ve Sack çalışmalarında [79], daha büyük beton yapıların durumunu değerlendirmek için ultrases geçiş hızı verilerini başarı ile kullanmışlardır. 1948'den 1965'e kadar yapılan 29 beton barajda binlerce geçiş hızı ölçümü yapılmıştır. Mc Henry ve Oleson [78], hız ölçümlerinin barajların onarımı veya bakımı ile ilgili sorunların çözümüne ve diğer gözlemlere katkı sağladığını belirtmişlerdir.

Betonun Dayanıklılığı Üzerine Yapılan Çalışmalar: Agresif ortamlar beton yapısına zarar verir ve geçiş hızını azaltır. Çeşitli araştırmacılar tarafından geçiş hızı yöntemi ile beton dayanımı üzerinde önemli rolleri olan; donma – çözülme etkisi, sülfat etkisi, alkali-silika reaksiyonu ve beton içindeki öğelerin korozyonunun neden olduğu bozulma gibi etkiler incelenmiştir [50,61]. Bir test numunesinin veya yerindeki betonun bozulması, aynı beton eleman üzerinde tekrarlayan testler yaparak izlenebilir [81–84]. Yangına maruz kalma nedeniyle betonun bozulması geçiş hızı yöntemi ile de başarılı bir şekilde tespit edilmektedir.

Avantajlar ve Sınırlamalar: Ultrases geçiş hızı yöntemi, betonun homojenliğini araştırmak için mükemmel bir yöntemdir. Test prosedürü basittir. Piyasadaki mevcut ekipmanların laboratuvarında olduğu gibi sahada da kullanımı kolaydır.

Test prosedürleri ASTM ve diğer kuruluşlar tarafından standartlaştırılmış ve test ekipmanlarına rahat bir şekilde ulaşılabilir. Sahada betonun kalite kontrolü, nispeten ucuz ve kullanımı kolay olan küçük, portatif dijital cihazların kullanılabilirliği ile yeni bir boyut kazanmıştır. Ultrases geçiş hızı testleri, hem laboratuvar boyutunda ki test numuneleri hem de beton yapılar üzerinde yapılabilir. Dolayısıyla, ultrases

tekniklerin beton yapılarda hem yüzey hem de iç çatlakların belirlenmesinde kullanılabilmesi büyük fayda sağlamaktadır.

2.3. Olgunluk Metodu

Olgunluk metodu; zamanın ve sıcaklığın, betonun basınç dayanımı gelişimi üzerindeki kombine etkilerini hesaba katan bir yöntemdir. Bu yöntem, inşaat sırasında yerinde basınç dayanımının güvenilir tahminlerini yapmak için kullanılır. Olgunluk metodunun kökeni, İngiltere’de 1940’ların sonunda ve 1950’lerin başında uygulanan beton buhar kürü üzerinde yapılan çalışmalara dayanmaktadır.

Bilindiği gibi, doğru bir şekilde üretilmiş ve yerleştirilmiş belirli bir beton karışımının basınç dayanımı, yaş ve sıcaklık özelliklerinin bir fonksiyonudur. Erken yaşlarda sıcaklık, basınç dayanımı gelişiminde çarpıcı bir etkiye sahiptir. Bu sıcaklık bağımlılığından dolayı, standart laboratuvar koşulları altında elde edilen basınç dayanımı verilerine dayanarak, yerinde basınç dayanımını hesaplamaya çalışırken sorunlar ortaya çıkmaktadır.

1950’li yıllarda zamanın ve sıcaklığın, betonun basınç dayanımının gelişimine etkilerini açıklayan bir yaklaşım önerilmiştir. Buhar kürü işlemlerinin betonun basınç dayanımı gelişimine etkilerini tahmin edebilmek için bir metot üzerinde çalışılıyordu. Kür süresi boyunca ölçülen sıcaklık geçmişinin, beton dayanımının göstergesi olacak tek bir sayıyı hesaplamak için kullanılabileceği düşünülmüştür. Saul bu tek sayıyı "olgunluk" olarak nitelenmiş ve basınç dayanımını tahmin etmek için bilinen "olgunluk metodunu" önermiştir [85].

Olgunluk metodunun yayınlanmasının ardından, geçerliliğine dair raporlar yayınlanmıştır [86,87]. Bununla birlikte, yöntemin başarısız olduğu durumlara ait raporlar da yayımlanmıştır [88,89]. İlk önerinin yapıldığı andan itibaren, kapsamlı bir araştırma yapılmış ve sıcaklık geçmişinden tahmin edilen basınç dayanımının doğruluğunu artırmak için değişiklikler önerilmiştir. Günümüzde olgunluk metodu; zamanın ve sıcaklığın, basınç dayanımı üzerindeki karmaşık etkilerini araştırmak için kullanılmaktadır. Yöntem, kür süresi boyunca kullanılır ve dolayısıyla mevcut beton yapılar için kullanılması mümkün değildir. Olgunluk metodu, beton kür süresi ve koşulları, kalıp alma süreleri ile ilgili çeşitli standartlar ve önerilen uygulamaları kapsamakta ve bu konulara çözümler sunmaktadır [90–93].

2.3.1. Tarihsel Gelişim

Malhotra tarafından 1971'den önce olgunluk metodunun kapsamlı bir incelemesi yayınlanmıştır [31]. İlk olarak, sıcaklık ve zamanın, basınç dayanımı gelişimine etkilerini açıklayan çeşitli olgunluk fonksiyonları önerilmiştir. Bunu, basınç dayanımının gelişimini, olgunluğun bir fonksiyonu olarak göstermek için önerilen ilişki çalışmaları takip etmiştir.

2.3.2. Olgunluk Fonksiyonları

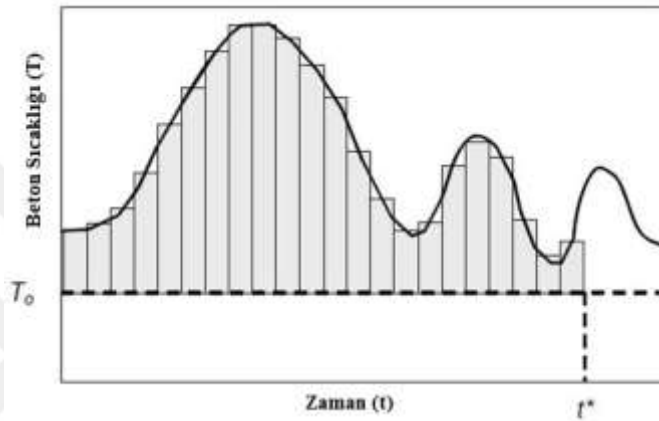
Olgunluk fonksiyonları, betonun gerçek sıcaklık geçmişini, basınç dayanımının ne kadar arttığını gösteren bir faktöre dönüştürmek için kullanılır. Bu konuda literatürde yer alan ilk çalışmalar, beton için hızlandırılmış kür yöntemleri ile ilgilidir. 1949'da McIntosh [94], kür sırasında betonun basınç dayanımı gelişimini tahmin etmek için çeşitli prosedürler geliştirmiştir. Zaman ve beton sıcaklığı çarpımının, kür süresi ile ilişkili olduğunu ifade etmiştir.

Nurse [95], McIntosh'un çalışmasının yayınlanmasından kısa süre sonra, düşük basınçlı buharla kürü ile ilgili çalışmalar yapmış ve önemli sonuçlar elde etmiştir. Ayrıca, zaman ve sıcaklık parametrelerinin farklı buhar kürü döngülerinde kullanılabileceğini sonucuna ulaşmıştır. Nurse [95], daha farklı bir yaklaşım geliştirmiş, hesaplamalarda gerçek beton sıcaklıklarını değil, betonun bulunduğu ortam sıcaklığını dikkate almıştır. Bununla birlikte, basınç dayanımı artışı, zaman ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak çizildiğinde, farklı beton türleri için farklı eğriler elde edildiğini göstermiştir.

1951'de Saul [85], İngiltere'de; Çimento ve Beton Birliği'nde gerçekleştirilen buhar kürü prensipleri üzerine yapılan araştırmalardan çıkan sonuçları derleyerek, bu konunun önemine dikkat çekmeye çalışmıştır. Olgunluk Metodu, artık zaman ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak ifade ediliyordu. Saul, olgunluğun, "bir referans sıcaklığa" göre hesaplanması gerektiğini vurgulamıştır. Bu değer, basınç dayanımı artışının en düşük hatta sıfıra yakın olduğu sıcaklıktır. Böylece olgunluk metodu, betonun sıcaklık geçmişinden yararlanarak, *Denklem 4* kullanılarak hesaplanabileceğini ortaya koymuştur:

$$\sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (4)$$

Denklem 4, Nurse-Saul fonksiyonu olarak bilinmektedir. Denklemi kullanırken, sadece beton sıcaklığının T_0 'dan daha fazla olduğu zaman aralıklarının, basınç dayanımına katkı sağladığı kabul edilir. Eğer beton sıcaklığı yaşa göre çizilirse eşitlik, sadece referans sıcaklığı ile sıcaklık eğrisi arasındaki alana eşit olmaktadır. Bu kavram, aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Şekil 11, bir beton elemanın belirli bir yaştaki sıcaklık geçmişini göstermektedir; taralı alan t^* yaşındaki betonun olgunluğunu (sıcaklık-zaman faktörü) temsil etmektedir.



Şekil 11. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu grafiği.

Saul, betonun 0 °C'nin (32 °F) altındaki sıcaklıklarda dayanım kazanmaya devam edeceğini kabul etmiştir. Böylece, yukarıdaki eşitlikte kullanmak için -10,5 °C (13 °F) bir referans sıcaklığı önermiştir. 1956'da Plowman [87] betonun zamanla basınç dayanımını kazanımının durduğu sıcaklığı belirlemek için yaptığı çalışmada, test verilerine dayanarak, referans sıcaklık için -12 °C (11 °F) değerini önermiştir. Genellikle, Nurse-Saul fonksiyonunun kullanıldığı uygulamalarda referans sıcaklığı -10 °C (14 °F) olarak kullanılmaktadır.

Saul [85], "olgunluk kuralı" olarak bilinen ilkeyi şöyle ifade etmiştir: Aynı olgunluğa sahip, beton numunelerin basınç dayanım değerleri aynıdır. Ayrıca Saul kuralın, buharla kür edilen betona uygulamalarında, betonun karıştırılmasından sonraki ilk 6 saat içerisinde de (beton sıcaklığının ilk 2 saat içerisinde yaklaşık 50 °C'ye veya yaklaşık 100 °C'ye ulaşmaması koşuluyla) bu ilkenin geçerli olduğunu ifade etmiştir. Erken yaş sıcaklık artışı aşırı derecede olursa, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu, beton davranışının ilk birkaç saatinde dayanımı olduğundan daha düşük tahmin etmektedir. Bu durum ileri yaş tahminlerinin doğruluğunu da olumsuz etkilemektedir. Böylece Saul, olgunluk

kuralının ve Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun kullanımında dikkat edilmesi gereken noktaları açıklamıştır.

Nurse-Saul fonksiyonu, belirli bir sıcaklık-zaman kür geçmişi bilinen betonun, referans sıcaklığını eşdeğer yaşa dönüştürmek için kullanılmaktadır:

$$t_e = \frac{\sum(T-T_0)}{(T_r-T_0)} \Delta t \quad (5)$$

Burada

t_e : referans sıcaklığındaki eş yaş

T_r : referans sıcaklığı

Bu durumda eşdeğer yaş, diğer sıcaklıktaki kür süresiyle aynı olgunluğa neden olacak referans sıcaklıktaki kür süresini temsil eder. Başlangıçta Rastrup [96] tarafından ortaya konulan eşdeğer yaş kavramı, *Denklem 5*'in yanı sıra, diğer fonksiyonların kullanılmasıyla beraber, zaman ve sıcaklığın basınç dayanımı gelişimine etkilerini hesaba katmak için uygun bir yöntemdir.

Denklem 6 ve *7*, şu şekilde ifade edilmektedir:

$$t_e = \sum \alpha \Delta t \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{(T-T_0)}{(T_r-T_0)} \quad (7)$$

"Yaş dönüşüm faktörü" olarak adlandırılan α oranı basit bir yoruma sahiptir: bir kür aralığı Δt 'yi, standart referans sıcaklığında eşdeğer kür aralığına dönüştürür.

1954'te Rastrup [96], eşdeğer bir yaş için; kabul edilen "sıcaklık 10 °C artarsa reaksiyon hızı ikiye katlanır önermesinin" temelinde fonksiyon olarak *Denklem 8*'i önermiştir:

$$t_e = \sum 2^{(T-T_r)/10} \Delta t \quad (8)$$

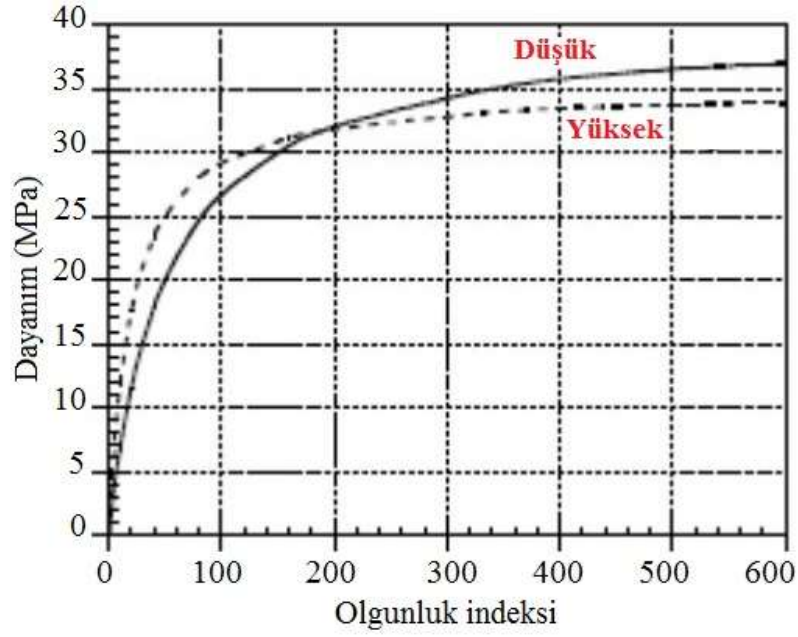
Örneğin, 43 °C'de (109 °F) bir kür süresi, 23 °C' de (73 °F) aynı kür süresinin dört katına eşdeğerdir. Wastlund [97], İsveç Çimento ve Beton Araştırma Enstitüsünde

yapılacak daha sonraki çalışmaların geniş bir sıcaklık aralığında Rastrup fonksiyonunun, hem zaman hem de sıcaklığın etkilerini temsil eden Nurse-Saul fonksiyonu kadar doğru olmadığını ifade etmiştir.

1956 yılında Plowman [87]; olgunluk yöntemi hakkında farklı bir görüş olan çalışmasını yapmıştır. 11,5 ve 18 °C (11 ile 64 °F) arasında değişen sıcaklıklarda kür edilen standart beton küp numuneler üretmiş, bu küp numuneleri düzenli aralıklarla test etmiş ve her karışım için dayanım ve olgunluk arasında bir ilişki olduğunu göstermiştir. Plowman'ın yayınındaki önemli nokta tüm numunelerin başlangıçta farklı kür sıcaklıklarına maruz kalmadan önce 24 saat boyunca normal bir kür sıcaklığına bırakılarak (16 ile 19 °C veya 61 ila 66 °F) dayanım kazanmasıydı. Böylece, tüm küp numunelerin erken yaş-sıcaklık davranışları aynı ve uzun vadeli beton test sonuçları yaklaşık olarak eşitti. Daha açık ifade edilirse, Plowman her karışım için yüksek doğruluklu dayanım-olgunluk ilişkileri elde etmeyi başarmıştı. Klieger [98], başlangıç kür sıcaklığının basınç dayanımı-olgunluk ilişkisi üzerinde etkili olduğunu çalışmalarında özellikle vurgulamıştır.

1962'de Alexander ve Taplin [89], beton ve çimento hamurunun dayanım kazanımının farklı sıcaklıklarda (5, 21 ve 42 °C) yapılan kür sıcaklıklarında, olgunluk kuralına uyup uymadığını belirlemek için bir çalışmanın yapmışlardır. Olgunluk, Nurse-Saul fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. McIntosh ve Klieger'in önceki gözlemleriyle uyumlu olarak, çimento hamuru ve betonun kür sıcaklığının; dayanım-olgunluk ilişkileri üzerinde sistematik etkilere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Sistematik etkilerin niteliği, şematik olarak Şekil 12'de sunulmuştur. Aynı olgunluk değerinde, yüksek kür sıcaklığına sahip numunelerin basınç dayanım değerleri düşük kür sıcaklığına sahip numunelerden daha yüksektir. Daha sonraki olgunluk değerlerinde ise yüksek kür sıcaklığı, daha düşük dayanım ile sonuçlanmıştır.

1968'de Verbeck ve Helmuth [99], Şekil 12'de gösterilen "çapraz etki" için önemli bir açıklama yapmışlardır. Başlangıçtaki daha yüksek bir başlangıç sıcaklığının, ilk hidrasyon hızında orantılı bir artıştan daha fazla sonuç verdiğini ileri sürmüşlerdir. Bu nedenle, kür şartlarının erken aşamasında, hızlı dayanım meydana geldiğinde, yüksek sıcaklıkta kür edilen betonun dayanımı, Nurse-Saul işlevine göre aynı olgunluğa sahip olmasına rağmen, daha düşük bir sıcaklıkta sertleşen betonda daha fazladır.



Şekil 12. Betonda erken yaş kür sıcaklığının dayanım-olgunluk ilişkisi üzerine etkisi.

1998 yılında J.-K. Kim, Y.-H. Moon, and S.-H. Eo [100]; belirli kür sıcaklıklarının etkilerini dikkate alarak çeşitli kür geçmişleri için dayanım gelişimini incelemişlerdir. Bu amaçla, 24 saatlik aralıklarla dört farklı kür süresi dikkate alınmıştır. Test sonuçları, erken yaşta yüksek bir sıcaklığa maruz kalan betonun erken yaşta daha yüksek, ancak nihai yaşta daha düşük basınç dayanımına ulaştığını göstermektedir. Erken yaşta düşük kür sıcaklığına maruz kalan beton, erken yaşta daha düşük dayanıma sahip olurken, nihai yaş dayanımında daha yüksek bir dayanıma sahip olmaktadır.

Sonuç olarak olgunluk metodu, sıcaklık ve zaman parametreleri yardımıyla betonun dayanım gelişimini tahmin etmek için etkin bir yöntemdir.

3. ÇALIŞMA PLANI ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde yapılan çalışmaların planı, kullanılan malzemelerin ayrıntılı özellikleri, karışım hesapları ve kullanılan test cihazları sunulmuştur.

3.1 Test ve Deney Planı

Bu tez çalışmasında, yerinde beton basınç dayanımının etkili bir şekilde belirlenmesi için mevcut tahribatsız test metotlarıyla yeni bir kombine yöntem geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ancak bu kombine metodun sadece laboratuvar değil, inşaat aşamasındaki yapılarda da kullanılabilir olması temel hedeflerden biridir. Bu hedefin gerçekleştirilmesi için halen inşaatı devam etmekte olan Kömürhan Köprüsü kule betonunun yerinde dayanım tespiti, tezin uygulama bölümü olarak belirlenmiştir. Kömürhan Köprüsü ile ilgili ayrıntılı bilgiler Bölüm 4’de sunulmuştur.

Bu tez çalışmasının üç ana adımı mevcuttur (Tablo 1). Birinci adımda, amaçlanan kombine metodun ilk denemesi için gerekli deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Bunun için, Kömürhan Köprüsü Kule (ayak) betonunda kullanılan betondan, standart küp numuneler alınmıştır. Bu numunelere 28 gün standart su kürü uygulanmıştır. Numuneler 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14, 20 ve 28. günlerde, ilk önce beton test çekici ile teste tabi tutulmuş, daha sonra aynı numuneler üzerinde basınç testi yapılmıştır. Kür sıcaklığı 23 ± 2 °C olduğundan olgunluk indeksi hesaplanırken, 28 gün boyunca beton sıcaklığı sabit 23 °C olarak kabul edilmiştir.

Tablo 1. Deney ve analiz planı.

DENEY PLANI		
1. Adım	2. Adım	3. Adım
Uygulanan Deneyler: - Beton Test Çekici - Olgunluk - Basınç Dayanımı (28 günlük)	Uygulanan Deneyler: - Beton Test Çekici - UPV - Olgunluk - Windsor Prob - Basınç Dayanımı (3, 7, 28 günlük)	Uygulanan Deneyler: - Beton Test Çekici - UPV - Olgunluk - Windsor Prob - Basınç Dayanımı (3, 7, 28 günlük)
Uygulama Bölümü: Kömürhan Köprüsü Kule Betonu ve numuneleri	Uygulama Bölümü: Kömürhan Köprüsü Kule Betonu ve numuneleri	Uygulama Bölümü: Laboratuvar numuneleri (Farklı karışım oranlarına sahip seriler)
Sonuç: MODEL-1	Sonuç: MODEL-2, 3, 4	Sonuç: MODEL-5

İkinci adımda, yine Kömürhan Köprüsü kule betonundan numuneler alınmıştır. 168,5 m yüksekliğindeki köprü ayağı (kule) dökülürken beton karışım değerleri hiç değişmemiştir. Köprü ayağı, 3 m yüksekliğinde bölümler halinde (kademeler) dökülmektedir. Her kademenin beton dökümünden 3, 7 ve 28 günlük beton basınç dayanımlarının tespiti için standart küp numuneler alınmıştır. Bu numuneler üzerinde UPV deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca windsor prob deneyi için numuneler alınmış ve köprü ayağı ile aynı kür şartlarına tabi tutulmuştur. Bunlara ilaveten kademe kalıbı söküldükten 3 gün sonra betondan test çekici ile yüzey sertliği ölçümleri yapılmıştır. Tahribatsız test metotları ile ölçümler 7. kademedan 43. kademeye kadar her aşamada yapıldı.

İkinci adımda yerinde yapılan ölçümlerin yanında, beton dökümü sırasında aynı harmandan numuneler alınarak, laboratuvarında testler yapıldı. 84 adet 100x100x100 mm'lik küp numuneler, 21 adet 150x150x150 mm'lik küp numuneler, 21 adet 200x200x100 mm'lik windsor numunesi alınmış ve 24 saat şantiyede kalıpta bekletilmiştir. Daha sonra numuneler özenle Fırat Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarına sevk edilmiştir. Laboratuvarında kalıptan çıkarılan numuneler kür tanklarına alınmıştır. Numuneler 3 farklı kür sıcaklığına tabi tutulmuştur: A) 10 ± 2 °C, B) 23 ± 2 °C ve C) 35 ± 2 °C. (A) ve (C) kür sıcaklıklarında sadece 100x100x100 mm'lik küp numuneler tutulmuştur. Diğer tüm numuneler (B) kür sıcaklığında tutulmuştur. Numunelere deneyler 1, 2, 3, 5, 7, 14 ve 28. günlerde uygulanmıştır. Numuneler kürden çıkarıldıktan sonra yüzey nemlerinin atılması için bir saat laboratuvar hava ortamında bekletilmiş, deneyler daha sonra uygulanmıştır.

Üçüncü adımda ise farklı karışım oranlarına ve farklı en büyük dane çaplarına sahip seriler üretilmiştir. Bu serilere ait numuneler 23 ± 2 °C su kürüne maruz bırakılmışlardır. Her bir serideki numunelere 3, 7 ve 28. günlerde testler uygulanmıştır. Her bir seri 9 adet 150x150x150 mm'lik küp ve 6 adet 200x200x100 mm'lik windsor numunelerinden oluşmaktadır.

3.2 Malzemeler

Deneyisel çalışmaların tamamında Elazığ SEZA Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Çimento hem deneyler için hem de Kömürhan Köprüsü betonlarında sürekli olarak aynı fabrikadan temin edilmiştir. Tablo

2’de verilen analiz sonuçları kulenin 10 nolu kademe betonunda kullanılan çimentoya aittir. Genel olarak çimentoların özellikleri incelendiğinde çok yakın fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip oldukları belirlenmiştir.

Tablo 2. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	CEM I 42,5 R	Özellik	CEM I 42,5 R
SiO ₂ (%)	18,92	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,13
Al ₂ O ₃ (%)	4,74	Priz başı (dk)	150
Fe ₂ O ₃ (%)	3,69	Priz sonu (dk)	235
CaO (%)	63,53	İncelik (cm ² /g)	3750-4100
Cl (%)	0,017	Basınç dayanımı, 2 gün	28,4
Ç. Kalıntı (%)	0,96	7 gün	40,5
K. Kaybı (%)	3,39	28 gün (MPa)	51,4

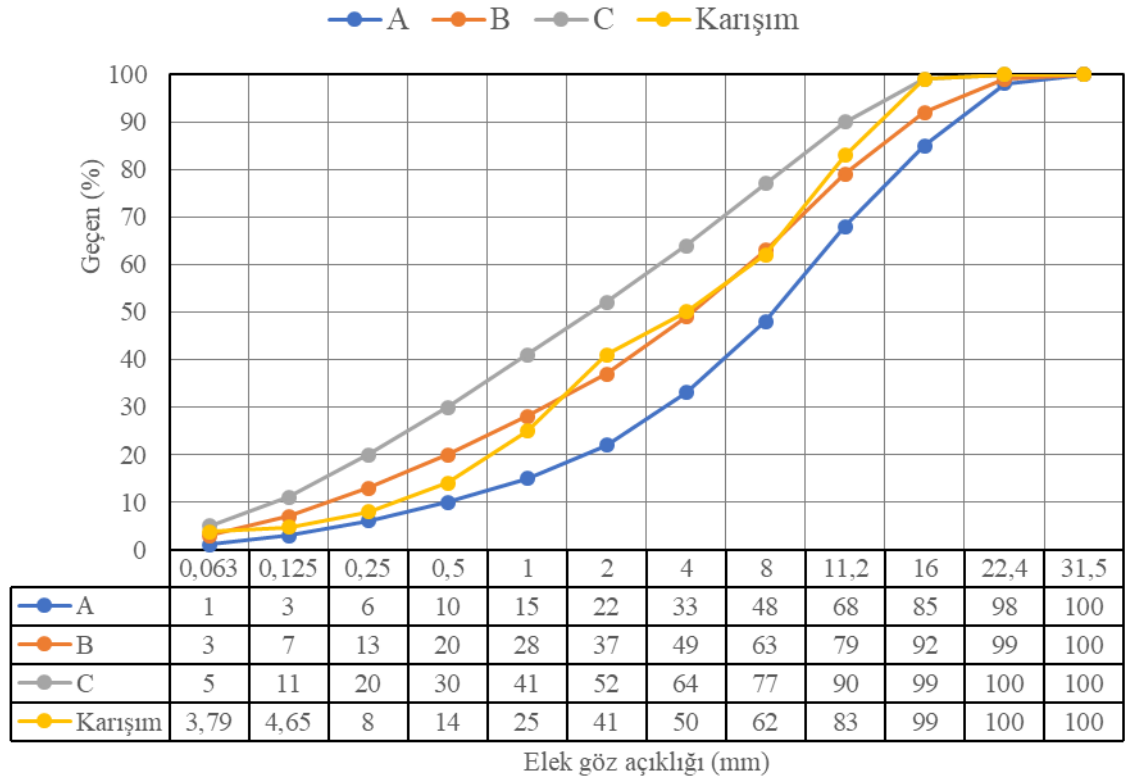
Deneylerin tamamında Elazığ ili, Baskil ilçesi’nden elde edilen en büyük dane çapı (D_{max}) 31,5 mm olan kalker agregası kullanılmıştır. İri (kalker), orta (kalker) ve ince (kalker taş tozu) malzemenin fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 3’de ve granülometri eğrisi ise Şekil 13’de verilmiştir.

Bu çalışmada TS EN 450-1’e göre sınıflandırılmış, C tipi uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4’de sunulmuştur.

Karışımlarda yüksek oranda su azaltıcı, polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kimyasal katkının rengi; kahverengi, yoğunluğu; 1,085±0,02gr/cm³, pH: 5,0 ve klorür İçeriği: <%0,1’dir.

Tablo 3. Agregaların fiziksel özellikleri.

Özellik	Birimi	Kırma Kum	Orta Kalker	İri Kalker
Metilen mavisi	G	0,75	-	-
Los Angeles aşınma	%	-	-	14,2
Görünür tane yoğunluğu	g/cm ³	2,72	2,70	2,71
Doygun yüzey kuru tane yoğunluğu	g/cm ³	2,64	2,64	2,68
Su emme	%	1,8	1,3	0,8



Şekil 13. Agregaların granülometrisi.

Tablo 4. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Deney Adı	Birim	Ölçüm Sonuçları	TS EN 197-1 İstenen Değer (TS EN 197-1 Standart Limit)
Kızdırma Kaybı	%	1,14	Kategori A/Maks.5,0 Kategori B/Maks.7,0 kategori C/Maks.9,0
SO ₃	%	0,94	Maks. 3,0
Cl-	%	0,0141	Maks. 0,1
Reaktif Cao	%	3,72	Maks. 10
Serbest Cao	%	0,01	-
45 µm Elek Bakiyesi (45 µm Sieve Residue)	%	9	Type C-Maks.40 Type F-Maks.12
28 Günlük Pozolanik Aktivite Endeksi	%	80,5	Min. 75
90 Günlük Pozolanik Aktivite Endeksi	%	*	Min. 85
Hacim genişmesi	mm	-	Maks. 10 (S.CaO>1,5
Yoğunluk	g/cm ³	2,43	-
Su İhtiyacı-Uçucu Kül	%	93	Maks. 95 (C tipi uçucu küller için)

3.3 Deneyler ve Test Metotları

Deney serilerine ait numunelerin basınç dayanımlarının tespit edilmesi için 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Basınç testi deneyleri TS EN 12390-3 standardı dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler teste tabi tutulduklarında yüzey kuru doygun durumda olmalarına özen gösterilmiştir [101].

Yüzey sertliği ölçümleri, ASTM C805/C805M-13a standardından faydalanılarak, schmidt beton test çekici yardımıyla yapılmıştır. Ölçüm yapılan yüzeyden 11 adet ölçüm alınmıştır. Bu 11 adet değer en yüksek ve en düşük değeri hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Geri kalan 9 adet ölçüm değerinin aritmetik ortalaması ölçüm yapılan betonun yüzey sertliği değeri olarak kabul edilmiştir [102].

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 [103].

Prob penetrasyon testi, ASTM C803/C803M-03 standardından faydalanılarak, windsor prob test ekipmanları yardımıyla yapılmıştır. 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 prob aletinin içine yerleştirilen metal prob, namlu içerisinde 5 cm içeri doğru itilmektedir. Standart enerjili olarak deneyin yapılması durumunda metal probun namlunun içine doğru itilmesi işlemi yapılmamaktadır. İlk testler yapılırken düşük enerji ile deneye başlanmıştır. Prob'un batma derinliği dikkate alınarak, testin hangi enerji seviyesi ile yapılacağına karar verilmiştir. İlgili tablolarda windsor prob testinin enerji seviyesi belirtilmiştir. Penetrasyon testinin sonucu, metal probun betonun dışında kalan kısmının uzunluğudur [104].

Olgunluk indeksleri, ASTM C918-02 ve ASTM C1074-98 standardından faydalanılarak, sertleşmiş beton sıcaklığının belirli zamanlarda ölçülmesiyle hesaplanmıştır. Olgunluk eğrisinin belirlenmesi için Kömürhan Köprüsü şantiye sahasında sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Köprü ayağının beton kademelerinden (7.

Kademeden 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 kullanılmıştır. A) 10 ± 2 °C, B) 23 ± 2 °C ve C) 35 ± 2 °C ve %90 nemli ortamda numuneler bırakılmışlar ve belirli yaşlarda sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuşlardır [105,106].

3.4 Beton Karışım Oranları

Bölüm 3.1 de belirtildiği gibi bu tez çalışmasındaki deneysel çalışmalar üç temel adımda ifade edilebilir. Birinci ve İkinci Adım çalışmalarında Kömürhan Köprüsü Pilonu (ters Y şeklindeki köprü ayağı/kule) için üretilen beton kullanılmıştır. Bu betonun içeriği Karayolları Genel Müdürlüğü ARGE Daire Başkanlığı tarafından belirlenmiştir. Şantiye sahasında dökülen betondan alınan numuneler laboratuvar deneylerinde ve tahribatsız testlerde kullanılmışlardır. Bu betonların karışım oranları ve malzemeleri hep aynı kalmış ve değiştirilmemiştir. Bu beton karışımına ait karışım oranları Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Kömürhan Köprüsü beton karışım oranları.

Seri Adı	C (kg/m ³)	Uçucu Kül (kg/m ³)	Toz (%)	Kim. Katkı (%)	W/C	W/ (C+UK)	Kum (0-4) (kg/m ³)	Orta Çakıl (4-16) (kg/m ³)	İri Çakıl 16-31,5 (kg/m ³)
Kömürhan	436	52	12	0,9	0,33	0,31	832	367	542

Üçüncü adımda ise farklı karışımlara sahip 24 beton serisi üretilmiştir. Bu karışımlara ait karışım oranları Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6. Üçüncü adım deney serileri beton karışım oranları (kg/m³).

Seri Adı	D _{max}	C	W/C	K/A	İri/A (%)	O/A (%)	Su	Top. A (%)	Kum	İri	Orta
16-1	16,0	320	0,53	0,45	-	0,55	170	707	853	0	1042
16-2	16,0	320	0,53	0,65	-	0,35	170	707	1232	0	663
16-3	16,0	320	0,58	0,45	-	0,55	186	691	834	0	1019
16-4	16,0	320	0,58	0,65	-	0,35	186	691	1204	0	648
16-5	16,0	400	0,48	0,45	-	0,55	192	659	795	0	971
16-6	16,0	400	0,48	0,65	-	0,35	192	659	1148	0	618
16-7	16,0	400	0,53	0,45	-	0,55	212	639	771	0	942
16-8	16,0	400	0,53	0,65	-	0,35	212	639	1113	0	599
16-9	16,0	480	0,40	0,45	-	0,55	192	633	764	0	933
16-10	16,0	480	0,40	0,65	-	0,35	192	633	1103	0	594
16-11	16,0	480	0,45	0,45	-	0,55	216	609	735	0	898
16-12	16,0	480	0,45	0,65	-	0,35	216	609	1061	0	571
32-1	31,5	320	0,53	0,45	0,25	0,30	170	717	865	477	572
32-2	31,5	320	0,53	0,65	0,15	0,20	170	717	1249	286	382
32-3	31,5	320	0,58	0,45	0,25	0,30	186	701	846	466	560
32-4	31,5	320	0,58	0,65	0,15	0,20	186	701	1221	280	373
32-5	31,5	400	0,48	0,45	0,25	0,30	192	669	807	445	534
32-6	31,5	400	0,48	0,65	0,15	0,20	192	669	1165	267	356
32-7	31,5	400	0,53	0,45	0,25	0,30	212	649	783	432	518
32-8	31,5	400	0,53	0,65	0,15	0,20	212	649	1131	259	345
32-9	31,5	480	0,40	0,45	0,25	0,30	192	643	776	428	513
32-10	31,5	480	0,40	0,65	0,15	0,20	192	643	1120	257	342
32-11	31,5	480	0,45	0,45	0,25	0,30	216	619	747	412	494
32-12	31,5	480	0,45	0,65	0,15	0,20	216	619	1079	247	329
D _{max} : En büyük dane çapı, C: Çimento, K/A: Kum/Agrega, O/A: Orta çakıl/Agrega											

Bu serilerin amacı; farklı en büyük agrega çapı, farklı çimento miktarı, farklı w/c oranı, farklı kum/agrega oranı ve dolayısıyla farklı beton basınç dayanımlarına sahip numuneler üretmektir. Beton karışım oranları belirlenirken standartların önerileri uygulamadaki talepler ve kullanım şartları dikkate alınmıştır.

4. KÖMÜRHAN KÖPRÜSÜ ve YERİNDE YAPILAN TESTLER

4.1 Kömürhan Köprüsü

Elazığ, Doğuda Gölüşkür Köprüsü, batıda Kömürhan Köprüsü arasında kalmış bir bağıdır. Bu bağ doğu ile batının birleşimidir. Bu bağ Doğunun Batıya, Batının Doğuya açılım kapısıdır. Elazığ konum olarak da üç tarafı sularla çevrili bir ada olduğundan dolayı bu iki köprü sayesinde Doğu ve Batıya açılım sağlamaktadır. Bununla birlikte Elazığ'ın kültürel yapısı da Doğu ve Batının buluşmasını sağlayacak bir yapıdır.

Kömürhan Köprüsü; Elazığ–Malatya Devlet Yolunun Fırat Nehri ile kesiştiği nokta olan 51. kilometresinde geçişi sağlayan köprüdür. Fırat Nehrinin bu kesimindeki tek köprü olduğu için lojistik önemi büyüktür. Kömürhan Köprüsü'nün Malatya ve Elazığ arasında ulaşımı sağlayan en kısa güzergâh üzerinde bulunması sebebiyle hemen hemen alternatifsizdir.

Kömürhan Köprüsü yapılmadan önce Elazığ–Malatya İlleri arasındaki ulaşım bağlantısı 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 sağlanmıştı (Şekil 14). Fakat suların yükselmesiyle birlikte ahşap köprü yıkılmış, dolayısıyla sal ve kayıklarla ulaşım tekrar dönülmüştür.



Şekil 14. Ahşap Kömürhan Köprüsü (1900'lu yılların başı).

Fırat Nehri'nin Kömürhan Boğazı mevkiinde, yüksek ayaklı ve geniş açıklıklı betonarme bir köprü yapılması kararlaştırılmış ve Nafia Vekaletince 1930'da ihale edilmiştir. İhaleyi kazanan İsveç firması olan Nydqvist ve Holm A.ř. tarafından 1932'de yapımı tamamlanmıştır. Toplam 164 m uzunluğunda, 6,40 m genişliğinde Betonarme Ankastre Kemer tipindeki Kömürhan Köprüsü, 109,60 metre orta açıklık uzunluğuyula, dönemi itibariyle dünyanın en büyük altıncı betonarme köprüsü olma özelliğini kazanmıştır (şekil 15).



şekil 15. Kömürhan Köprüsü (1932-1986).

1932'de hizmete açılan köprü, 80'li yıllarda yapılan Karakaya Barajı nedeniyle su altında kalmıştır. Halen trafiğ   hizmet veren mevcut k  pr  n  n yapımına 23.02.1983 tarihinde başlanmış, eski köprü su altında kalmadan önce 08.04.1986 yılında tamamlanarak trafiğ   a ılmıştır.

Bu yapı Türkiye'nin ilk dengeli konsol yöntemiyle imal edilmiş köprüsü olma özelliğı taşıtmaktadır. 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 (şekil 16).



  kil 16. Kömürhan Köprüsü (1986-...).

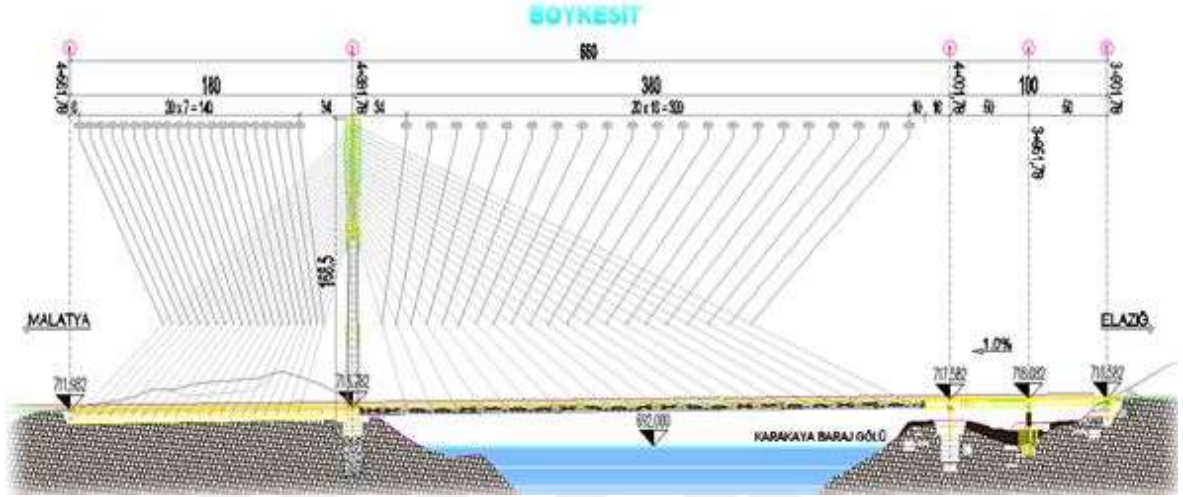
T  rk  lere konu olan bu köprü, Malatya ile Elazığ il sınırında olup 1986 yılından beri de Karakaya Baraj g  l  n  n iki tarafını birbirine bağlamaktadır.

Acil Eylem Programı kapsamında; Elazığ–Malatya   lleri arasında hizmet veren karayolunun bölünmüş yola dönüştürülmesi ile ilgili çalışmaların tamamlanmasıyla, mevcut k  pr  n  n bulunduğu noktada darboğaz oluşmuştur. Bu nedenle oluşan bu olumsuz durumun düzeltilmesi gayesiyle Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından eski köprü kullanılmak şartıyla yeni bir köprü yapımına karar verilmiştir.

Baraj Gölü içine ayak konulması çok zor ve masraflı olacağından baraj g  l  n  n büyük açıklıklı bir köprü ile geçilmesi gereği doğmuştur. Kömürhan Köprüsü Gergin Eğik Askılı tip olarak dizayn edilmiştir (  kil 17). Gergin eğik kablolu köprülerin günümüzde tercih edilmesinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bu nedenler şu şekilde sıralanabilir:

- Malzemenin etkili bir şekilde kullanılması,
- Taşıma sisteminde yüksek düzeyde yedekliğinin olması,
- Asma tip köprülere göre daha az sehim yapması,
- Üst yapı kalınlık / açıklık oranının düşük seviyede tutulabilmesi,
- Üst yapısının basit ve kolayca yapılabilir olması,
- Hafif bir üst yapıya sahip olması,

- Yapım hızının avantajlı olması,
- Az bakım gerektirmesi,
- Birçok yerde estetik olarak güzel olması,
- Asma köprülere göre genelde daha az maliyetli olması.



Şekil 17. Yeni Kömürhan Köprüsü boykesiti (2020-...).

Yeni Kömürhan Köprüsünde “değiştirilmiş fan” olarak adlandırılan kablo yerleşimi kullanılmıştır. Bu sistemde kablolar olabildiğince kule tepe bölgesine yakın fakat aralıklı olarak ankre edilmektedir. Böylelikle kabloların taşıma kapasiteleri maksimum ölçüde kullanılabilir.

Yeni Kömürhan Köprüsünde ters-Y tipi kule tasarlanmıştır (Şekil 18). Bu sayede kabloların kulenin dik kısmına ankre edilmesi suretiyle yapım kolaylığı sağlanmış, ayrıca da enine yönde hem deprem hem de rüzgâr etkilerine karşı rijitlik sağlanmıştır.

Yeni Kömürhan köprüsü 180 m kenar açıklığa, 380 m orta açıklığa ve 100 m yaklaşım köprüsüne sahip olup toplam 660 m uzunluğundadır. Yaklaşım köprüsü arduermeli betonarme 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, 6,40 m’lik 1 adet anodan ve 2,1 metrelik anolardan (toplam 25 adet) oluşmaktadır.

Segment ağırlıkları 48 ton ile 344 ton arasında değişmektedir. Köprüde, ters-Y tipi 168,5 m yüksekliğindeki kule (pilon) mevcuttur. 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. Kablolar tabliye ortasında tek düzlemde bağlanmaktadır. Arka kablolar 21 adet olup 180 m uzunluğundaki temel bloğuna

bağlanmaktadır. 1 adet kablodaki halat sayısı 55 ile 120 arasında, kablo uzunlukları ise 107 m ile 238 m arasında değişmektedir. Üstyapı 23,86 m genişliğinde, 3,50 m yüksekliğindedir.



Şekil 18. Yeni Kömürhan Köprüsü inşaat çalışmaları (2019).

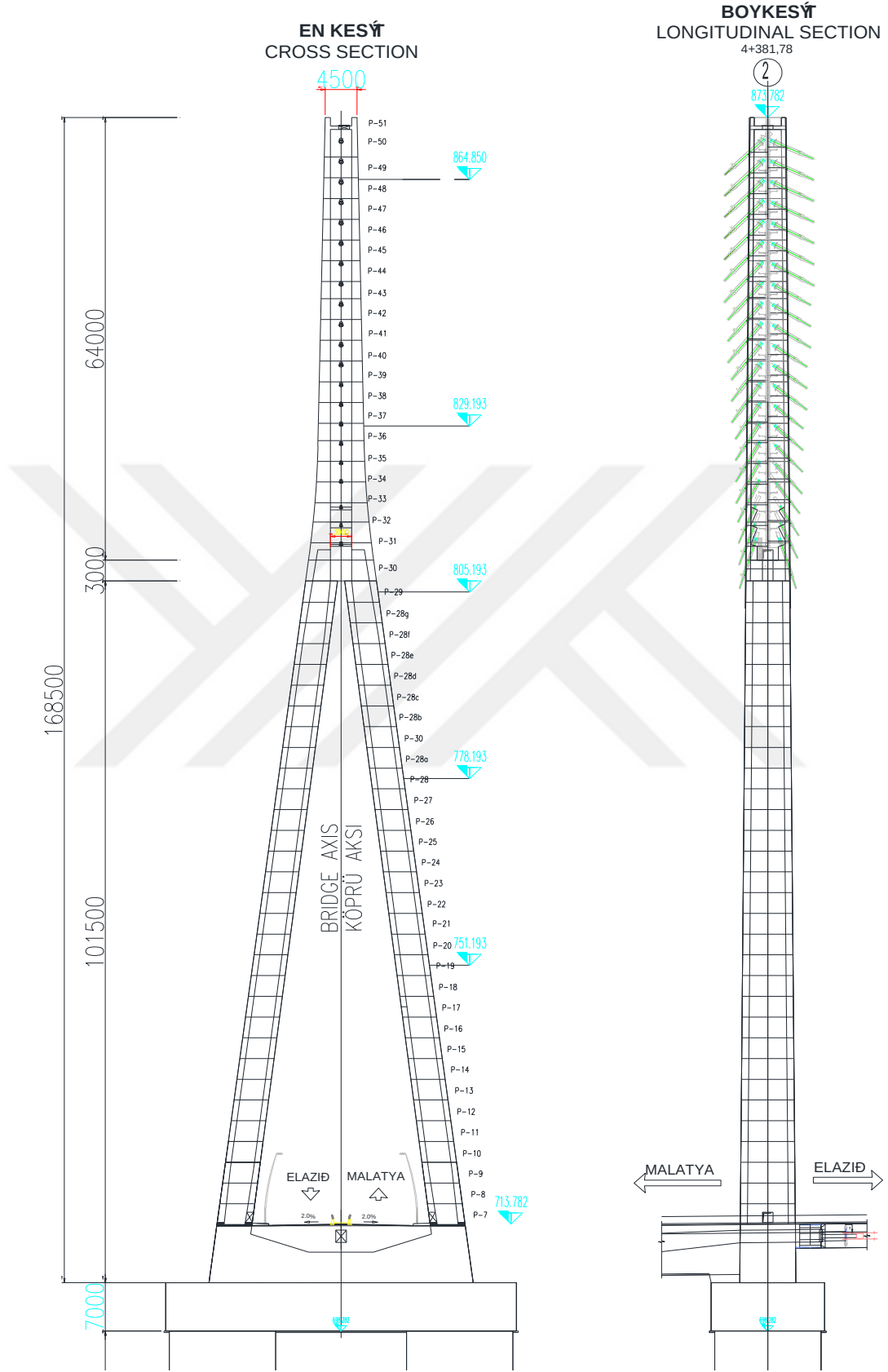
4.2 Yerinde Yapılan Test ve Ölçümler

Bu tez çalışmasında, inşa halinde olan Kömürhan Köprüsü kule betonunun, dayanım gelişim kontrolü ve kalıp alma sürelerinin doğru tespiti için tahribatsız test metotları kullanılarak, en az bir kombine metot geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, betonun yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı, windsor prob ve olgunluk metotları için yerinde testler yapılmış ve ölçümler alınmıştır. Kömürhan Köprüsü ayağı (pilonu) ters Y biçimindedir. Her üç metrelik pilon (kule) kademesi ayrı bir numara ile isimlendirilmiştir ancak aynı kottaki pilonların numarası değişmemekte sadece sağ ve sol olarak isimlendirilmektedir. Pilon yapısı, genel özellikleri, enkesit ve boykesiti Şekil 19’da, daha detaylı görünüşler ise Şekil 20’de verilmiştir.

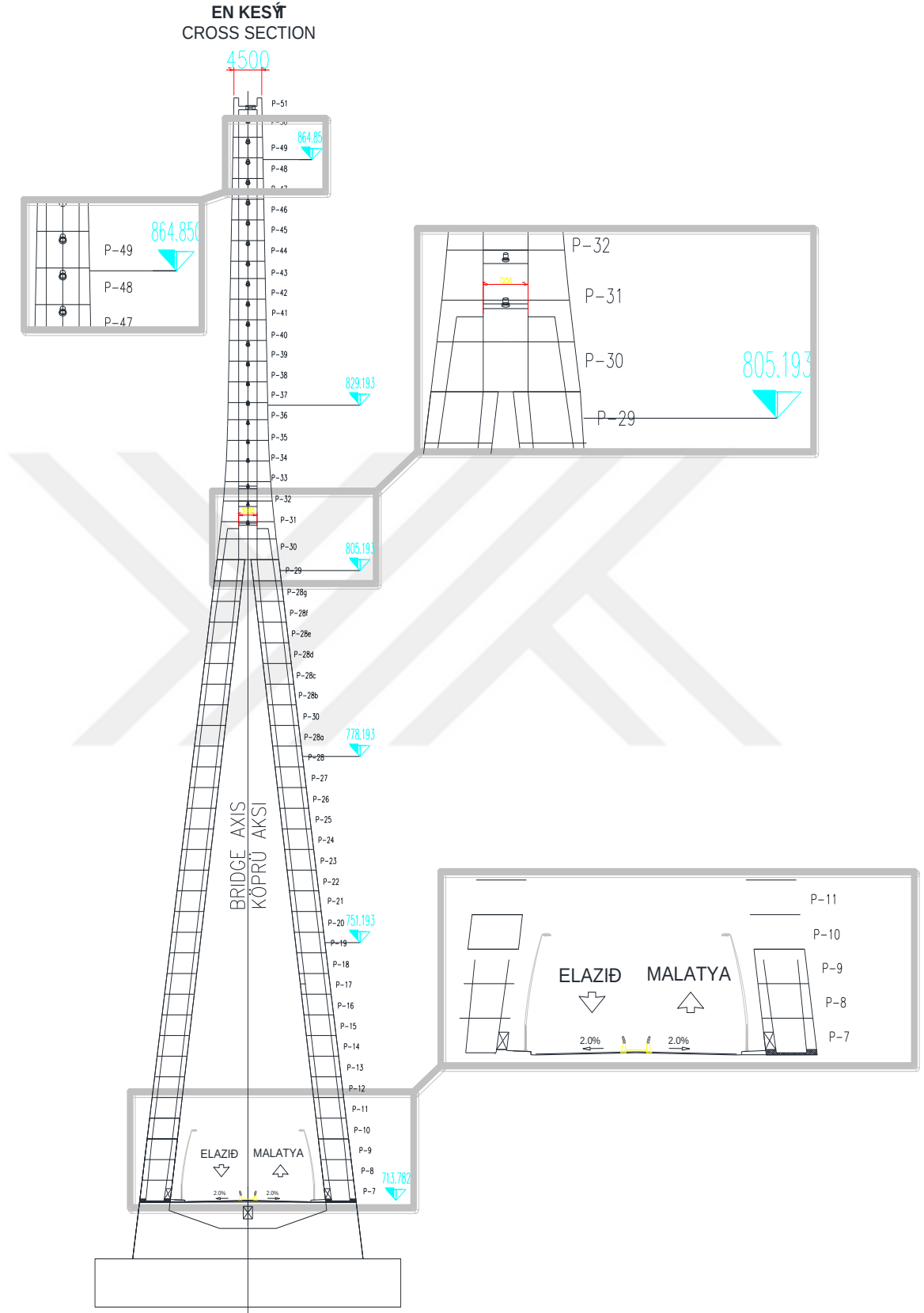
Tez kapsamında yerinde yapılan ölçümler ve alınan numuneler, 7. Pilon ile 43. Pilon arasını kapsamaktadır. Pilon yedinci kademesinden, kırk üçüncü kademesine kadar beton numuneler alınmış hem alınan numunelere hem de pilon betonlarına testler

uygulanmıştır. Tez kapsamında çalışılan pylonların her birinden 9 adet 150x150x150 mm küp ve 3 adet 200x200x100 mm windsor numunesi alınmıştır. Numunelere test edilecekleri güne kadar, pylonlarla aynı kür şartları uygulanmıştır. Beton numuneler 3, 7 ve 28. günlerde test edilmişlerdir. Küp beton numuneler basınç deneyine tabi tutulmadan önce ultrases geçiş hızı testleri yapılmıştır. Her pilondan 3, 7 ve 28. günlerde beton test çekici ile ölçüm alınmıştır. Bunlara ilaveten, pylonların beton dökümleri sırasında yaklaşık 90 cm derinliğe özel kablolar yerleştirilmiş ve beton dökümünden itibaren 24 saatte bir 96 saat boyunca beton sıcaklığı kayıt altına alınmıştır.

Tablo 7’de beton basınç deneylerine ait ortalama dayanım değerleri, pylon bilgileri, beton dökümü sırasındaki beton sıcaklığı ve döküm tarihi ile beraber verilmiştir. Tablo 8’de pylon betonlarından ölçülen beton test çekici değerleri, küp numunelerden elde edilen ultrases geçiş hızı değerleri ve windsor numunelerinden elde edilen w (prob uzunluğu-batma derinliği değeri) değerleri sunulmuştur. Kademe dökümleri yapıldıktan sonra beton içerisine yerleştirilen özel kablolar yardımıyla 24 saatte bir 96 saat boyunca ölçülen sıcaklıklar Tablo 9’de sunulmuştur. Olgunluk metodu kontrolü Kömürhan Köprüsü için sadece erken yaş dayanımında yapılmıştır. Bu değerleri rahat kıyaslanması için beton dökümü sırasındaki hava sıcaklıkları da Tablo 8’de tekrar verilmiştir.



Şekil 19. Kömürhan Köprüsü Kulesi şematik görünüşü.



Şekil 20. Kömürhan Köprüsü pylon detayları.

Tablo 7. Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin beton basınç dayanımları.

Seri Adı	Döküm Yeri	Döküm Tarihi	Beton Sıcaklığı (°C)	Basınç Dayanımları (MPa)		
				3 günlük	7 günlük	28 günlük
P 7 Sağ	Pilon P 7	26.12.2017	14,6	51,2	65,6	68,6
P 7 Sol	Pilon P 7	30.12.2017	13,6	58,6	58,6	71,1
P 8 Sağ	Pilon P 8	8.01.2018	13,6	55,8	63,8	71,6
P 8 Sol	Pilon P 8	11.01.2018	14,1	57,7	58,9	65,5
P 9 Sağ	Pilon P 9	16.01.2018	11,8	56,5	59,2	68,5
P 10 Sağ	Pilon P 10	27.01.2018	14,7	59,5	67,8	72,3
P 11 Sağ	Pilon P 11	3.02.2018	14,5	58,1	66,8	71,5
P 12 Sol	Pilon P 12	12.02.2018	12,8	55,0	63,6	70,5
P 13 Sağ	Pilon P 13	14.02.2018	12,1	60,2	63,3	77,1
P 14 Sol	Pilon P 14	23.02.2018	12,7	55,1	61,4	70,6
P 15 Sağ	Pilon P 15	26.02.2018	12,2	59,8	62,4	72,8
P 16 Sağ	Pilon P 16	3.03.2018	12,5	58,7	63,3	72,0
P 17 Sağ	Pilon P 17	11.03.2018	13,8	53	66,0	68,0
P 18 Sağ	Pilon P 18	16.03.2018	17,2	56,5	64,9	72,5
P 19 Sol	Pilon P 19	29.03.2018	18,4	51,9	61,7	66,6
P 20 Sağ	Pilon P 20	3.04.2018	17,2	55,6	57,4	71,3
P 21 Sağ	Pilon P 21	9.04.2018	19,2	52	53,7	68,8
P 22 Sağ	Pilon P 22	14.04.2018	21,5	50,2	58,9	64,4
P 23 Sol	Pilon P 23	26.04.2018	18,7	53,5	62,3	68,6
P 24 Sol	Pilon P 24	2.05.2018	22,4	56,7	63,5	72,6
P 25 Sol	Pilon P 25	7.05.2018	20,2	57,1	63,8	74,2
P 26 Sol	Pilon P 26	14.05.2018	21,8	56,4	60,9	72,3
P 27 Sol	Pilon P 27	19.05.2018	24,8	55,4	59,2	71,1
P 28 Sol	Pilon P 28	28.05.2018	27,1	53,9	54,5	62,4
P 28 - A Sol	Pilon P 28 - A	4.06.2018	27,1	54,4	60,8	69,8
P 28- C Sağ	Pilon P 28- C	11.06.2018	26,3	53,8	54,1	69,4
P 28- D Sağ	Pilon P 28- D	21.06.2018	27,6	52,3	57,8	63,9
P 28- B Sol	Pilon P 28- B	23.06.2018	29,1	53,1	60,7	68,1
P 28- C Sol	Pilon P 28- C	4.07.2018	31,3	51,9	61,3	66,6
P 28- E Sol	Pilon P 28- E	21.07.2018	25,7	53,9	56,5	69,1
P 28- G Sol	Pilon P 28- G	6.08.2018	29,8	53,9	56,0	69,1
P30	Pilon P30	21.11.2018	17,3	53,4	61,2	70,5
P31	Pilon P31	6.12.2018	13,2	55	63,3	70,5
P31 2. Kad.	Pilon P31 2. Kademe	12.12.2018	13,4	54,4	62,7	69,7
P32 2. Kad.	Pilon P32 2. Kademe	29.12.2018	11,7	56,9	65,5	70,9
P33 2. Kad.	Pilon P33 2. Kademe	19.01.2019	10,6	54	66,0	70,5
P35 Ano	Pilon P35 Ano	20.02.2019	13,8	55,5	64,9	71,1
P36 Ano	Pilon P36 Ano	8.03.2019	13,3	55,7	65,3	71,4
P37 Ano	Pilon P37 Ano	27.03.2019	14,2	55,6	65,3	70,6
P38 Ano	Pilon P38 Ano	12.04.2019	15,7	50,9	59,0	65,3
P39 Ano	Pilon P39 Ano	25.04.2019	18,6	49,3	59,1	63,2
P40 Ano	Pilon P40 Ano	9.05.2019	19,8	51,9	58,9	66,6
P41 Ano	Pilon P41 Ano	21.05.2019	24,3	48,6	58,2	62,3

Tablo 8. Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin tahribatsız test ölçümleri.

Seri Adı	Beton test çekici ölçümleri (R)			Ultrases geçiş hızı ölçümleri (V)			Windsor prob derinliği (batmayan kısım) (w)		
	3. gün	7. gün	28. gün	3. gün	7. gün	28. gün	3. gün	7. gün	28. gün
P 14 Sol	45	47	48	3,6	4,0	4,6	55,1	58,3	59,3
P 15 Sağ	45								
P 16 Sağ	44								
P 17 Sağ	44								
P 18 Sağ	43								
P 19 Sol	41								
P 20 Sağ	43	44	45	3,5	3,9	4,4	54,9	57,6	58,9
P 21 Sağ	40								
P 22 Sağ	42								
P 23 Sol	43								
P 24 Sol	45								
P 25 Sol	43	45	47	3,5	3,8	4,4	54,7	57,7	59,0
P 26 Sol	44								
P 27 Sol	44								
P 28 Sol	45								
P 28 - A Sol	44								
P 28 - C Sağ	45								
P 28 - D Sağ	45								
P 28 - B Sol	44								
P 28 - C Sol	45	46	47	3,7	3,9	4,4	53,1	57,7	58,8
P 28 - E Sol	45								
P 28 - G Sol	44								
P30	41								
P31	43								
P31 2. Kad.	43								
P32 2. Kad.	43								
P33 2. Kad.	41								
P35 Ano	42								
P36 Ano	43								
P37 Ano	42	42	44	3,6	3,9	4,5	54,3	58,1	59,8
P38 Ano	42								
P39 Ano	41								
P40 Ano	44								
P41 Ano	43	45	48	3,4	3,8	4,3	51,3	57,2	58,3

Tablo 9. Kömürhan Köprüsü pilon kademelerinin 4 günlük ortalama beton sıcaklıkları.

Seri Adı	Hava Sıcaklığı (°C)	Beton sıcaklıkları					
		24. saat	48. saat	72. saat	96. saat	72 saat Ortalaması	96 saat Ortalaması
P 7 Sağ	14,6	54	46	36	27	45,3	40,8
P 7 Sol	13,6	66	54	45	34	55,0	49,8
P 8 Sağ	13,6	43	56	46	40	48,3	46,3
P 8 Sol	14,1	40	35	24	19	33,0	29,5
P 9 Sağ	11,8	39	47	41	31	42,3	39,5
P 10 Sağ	14,7	45	48	32	26	41,7	37,8
P 11 Sağ	14,5	49	39	32	28	40,0	37,0
P 12 Sol	12,8	50	42	33	26	41,7	37,8
P 13 Sağ	12,1	52	37	24	20	37,7	33,3
P 14 Sol	12,7	54	40	31	24	41,7	37,3
P 15 Sağ	12,2	48	39	29	24	38,7	35,0
P 16 Sağ	12,5	53	40	33	25	42,0	37,8
P 17 Sağ	13,8	56	43	32	23	43,7	38,5
P 18 Sağ	17,2	55	44	35	25	44,7	39,8
P 19 Sol	18,4	55	46	32	24	44,3	39,3
P 20 Sağ	17,2	57	46	37	27	46,7	41,8
P 21 Sağ	19,2	60	51	42	32	51,0	46,3
P 22 Sağ	21,5	60	48	38	30	48,7	44,0
P 23 Sol	19,7	61	47	36	26	48,0	42,5
P 24 Sol	21,1	63	56	41	29	53,3	47,3
P 25 Sol	23,2	62	53	43	32	52,7	47,5
P 26 Sol	22,3	60	54	40	30	51,3	46,0
P 27 Sol	22,6	60	51	40	31	50,3	45,5
P 28 Sol	26,3	63	55	42	32	53,3	48,0
P 28 - A Sol	25,2	63	51	40	30	51,3	46,0
P 28 - C Sağ	26,4	66	52	41	34	53,0	48,3
P 28 - D Sağ	26,3	64	51	38	31	51,0	46,0
P 28 - B Sol	27,6	65	54	41	33	53,3	48,3
P 28 - C Sol	29,6	54	67	53	40	58,0	53,5
P 28 - E Sol	27,8	51	66	50	38	55,7	51,3
P 28 - G Sol	27,6	55	71	54	43	60,0	55,8
P30	24,8	64	52	44	36	53,3	49,0
P31	17,3	62	53	41	32	52,0	47,0
P31 2. Kademe	13,2	46	53	48	34	49,0	45,3
P32 2. Kademe	10,5	44	55	49	36	49,3	46,0
P33 2. Kademe	10,2	52	45	34	30	43,7	40,3
P35 Ano	11,2	46	53	50	36	49,7	46,3
P36 Ano	13,8	52	47	41	36	46,7	44,0
P37 Ano	13,3	52	62	50	34	54,7	49,5
P38 Ano	14,2	46	64	51	38	53,7	49,8
P39 Ano	15,7	63	49	40	31	50,7	45,8
P40 Ano	18,6	66	51	39	30	52,0	46,5
P41 Ano	19,8	65	46	35	27	48,7	43,3

5. DENEY SONUÇLARI, YERİNDE ÖLÇÜMLER ve DEĞERLENDİRMELER

Birinci adım deneyler kapsamında kürden çıkarılan numuneler yüzeyleri kuruduktan sonra manuel beton test presinde sıkıştırılmış ve beton test çekici ölçümleri (R) yapılmıştır (Şekil 21). Daha sonra 3000 kN'luk yük kontrollü test presinde basınç testleri gerçekleştirilmiştir ve dayanım sonuçları (f_c) belirlenmiştir. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalamaları Tablo 10'da sunulmuştur. Ayrıca *Denklem 1*'e göre hesaplanan olgunluk indeksi değerleri (M) Tablo 10'da görülmektedir.

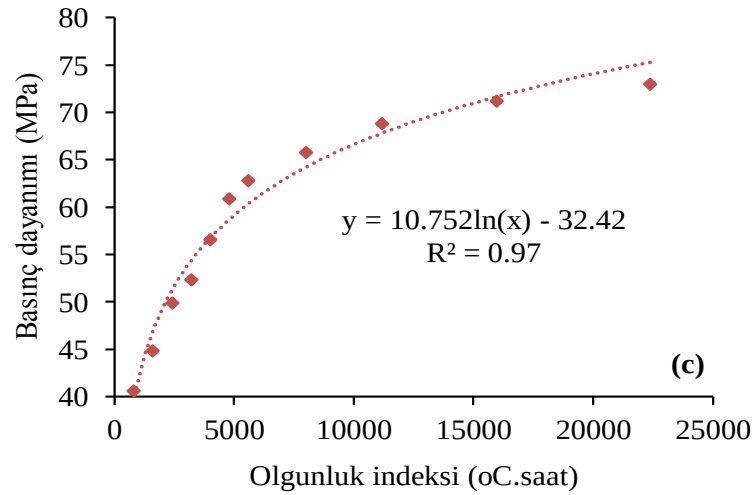
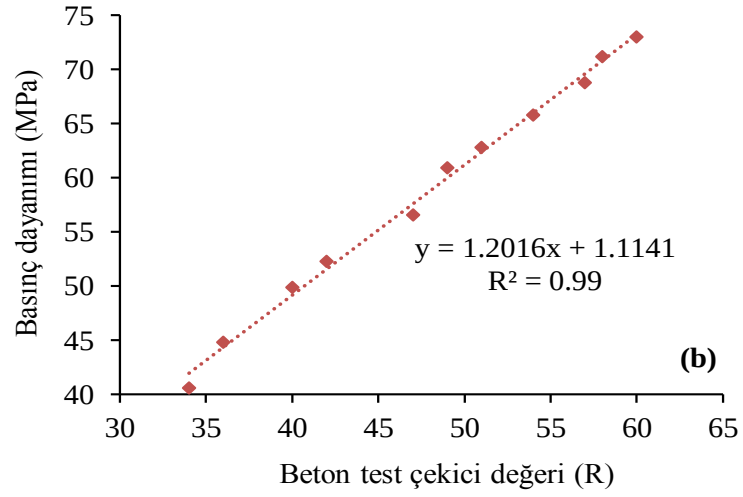
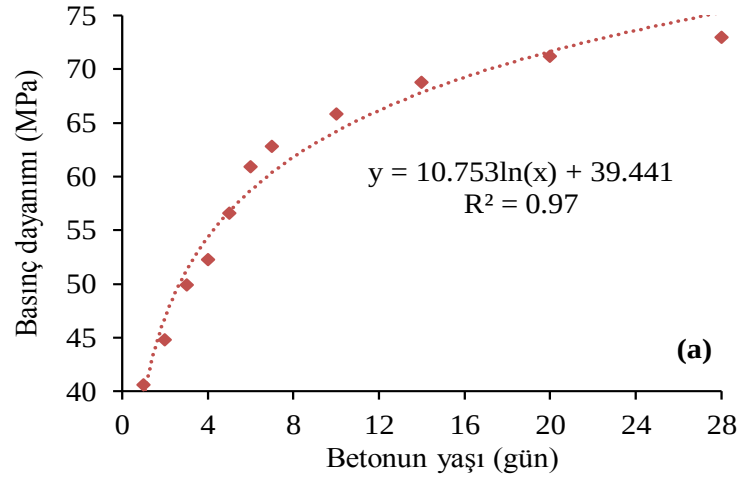
Şekil 22'de betonun yaşı, basınç dayanımı, beton test çekici değeri ve olgunluk indeksi değerlerinin değerlendirmeleri yapılmış ve aralarındaki ilişkiler belirlenmiştir. Betonun yaşı ilerledikçe, basınç dayanımı da artmaktadır.



Şekil 21. Beton test çekici testleri

Tablo 10. Birinci adım deney sonuçları

Yaş (gün)	f_c (MPa)	R	M (°C.saatt)	Yaş (gün)	f_c (MPa)	R	M (°C.saatt)
1	40,6	34	792	7	62,8	51	5544
2	44,8	36	1584	10	65,8	54	7920
3	49,9	40	2376	14	68,8	57	11088
4	52,3	42	3168	20	71,2	58	15840
5	56,6	47	3960	28	73,0	60	22176
6	60,9	49	4752	-	-	-	-

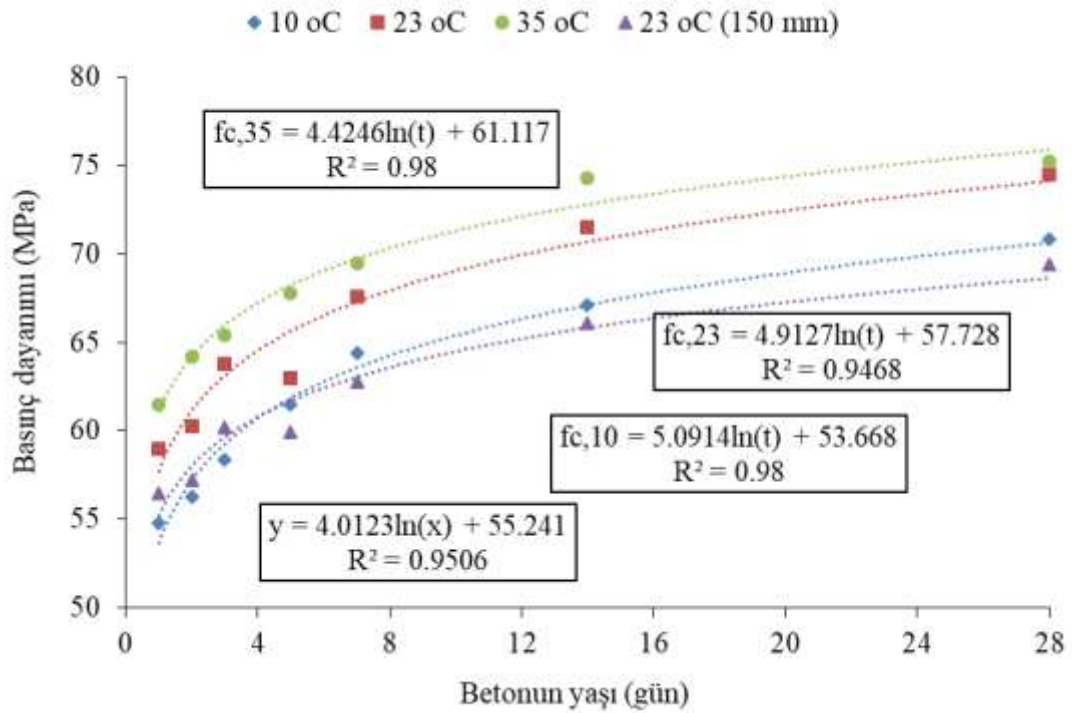


Şekil 22. Birinci adım beton numunelerin ilişki grafikleri a) Basınç dayanımı-yaş, b) Basınç dayanımı-beton yüzey sertliği, c) Basınç dayanımı-olgunluk indeksi.

İkinci adım deneylerde Kömürhan Köprüsü şantiye sahasından laboratuvara getirilen numuneler, belirlenen yaşlarda test edilmişlerdir. Beton küp numunelere ait basınç deneyi sonuçları Tablo 11’de verilmiştir. Sonuçlar kür edildikleri sıcaklığa göre düzenlenmiştir. Şekil 23’de görüldüğü gibi kür sıcaklığı arttıkça beton dayanımı artmıştır. Kür sıcaklığının artması, hidrasyon ısını ve dolayısıyla hızını artırmaktadır. Hidrasyon arttıkça beton dayanımı da artmaktadır.

Tablo 11. İkinci adım deneyleri beton basınç dayanım sonuçları.

Yaş (gün)	Basınç dayanımları (MPa) [100 mm x 100 mm]			Basınç dayanımı (MPa) [150 mm x 10 mm]
	10 °C	23 °C	35 °C	23 °C
1	54,8	59	61,5	56,5
2	56,3	60,3	64,2	57,2
3	58,4	63,8	65,4	60,2
5	61,5	63	67,8	59,9
7	64,4	67,6	69,5	62,8
14	67,1	71,5	74,3	66,1
28	70,8	74,5	75,2	69,4



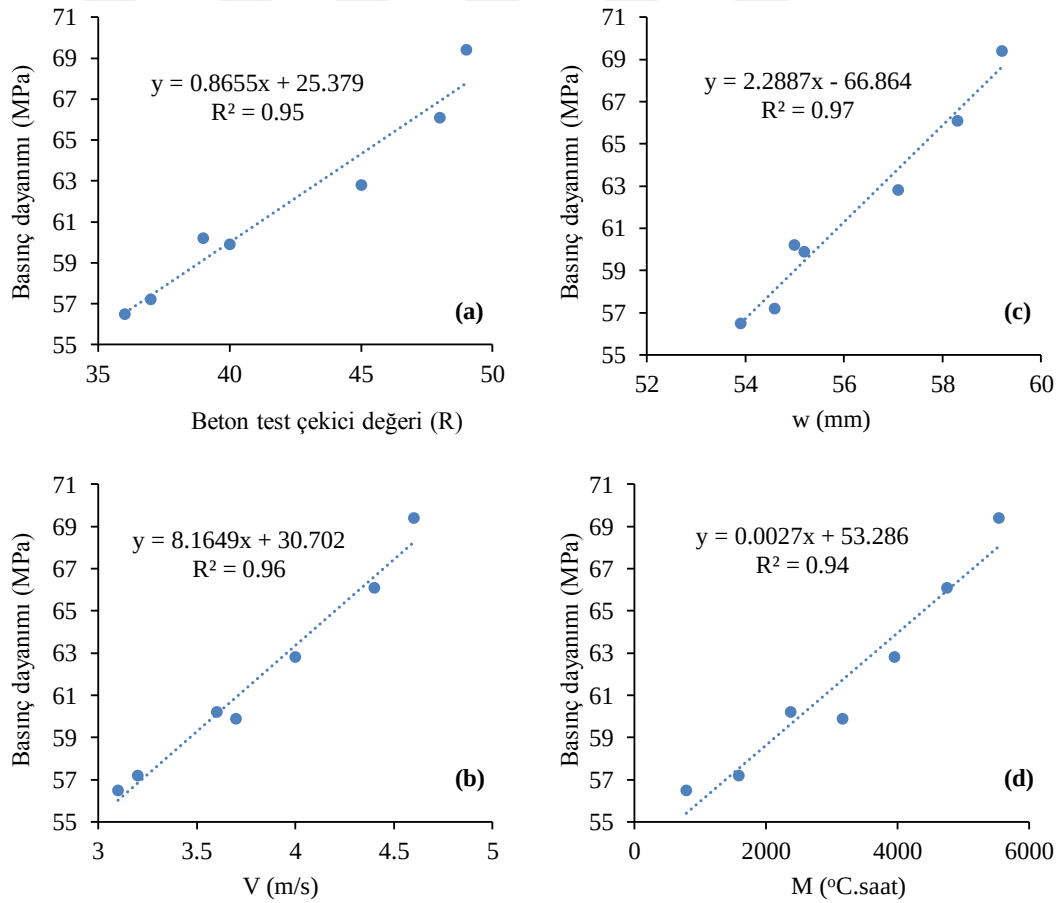
Şekil 23. Farklı kür sıcaklıklarında basınç dayanımı-yaş ilişkisi.

İkinci adım deneylerine ait tahribatsız test sonuçları Tablo 12’de verilmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımı ile beton test çekici, ultrases geçiş hızı, windsor probun

batmayan kısmının uzunluğu ve olgunluk indeksi sonuçları arasındaki ilişki Şekil 24’de gösterilmiştir.

Tablo 12. İkinci adım deneyleri tahribatsız beton test sonuçları.

Yaş (gün)	Beton test çekici (R)	Ultrases geçiş hızı (V)	Probun batmayan uzunluğu (w)	M (23 °C) (°C.saatt)
1	36	3,1	53,9	792
2	37	3,2	54,6	1584
3	39	3,6	55,0	2376
5	40	3,7	55,2	3960
7	45	4,0	57,1	5544
14	48	4,4	58,3	11088
28	49	4,6	59,2	22176



Şekil 24. Beton dayanımı ile tahribatsız test metodu arasındaki ilişkiler.

Windsor prob deneylerine ait uygulamalar Şekil 25 ve Şekil 26’da görülmektedir. Bu deney sonuçları, betonun içyapı özelliklerinden de etkilenmesi bakımından önemlidir. Probun beton dışında kalan uzunluğu (w) kullanılarak hesaplamalar yapılır.



Şekil 25. Windsor prob testi uygulanmış numuneler ve test cihazı.



Şekil 26. Windsor prob test cihazı, ölçüm cihazı ve numuneler.

Ultras ses geçiş hızı (UPV) test ölçümleri de diğ er deneyler gibi numunelerin yüzeyi kuruduktan sonra uygulanmıştır. Test cihazı ve numuneye ait görüntü şekil 27’de sunulmuştur.



şekil 27. UPV ölçüm cihazı ve standart beton numune.

Üçüncü adım beton test sonuçları Tablo 13’de sunulmuştur. Üçüncü adımdaki test serileri farklı karışım oranlarına ve iki farklı en büyük dane çapına sahiptirler. Karışım oranlarının farklı olması, birçok parametreye bağlı olarak beton basınç dayanımının değişmesini sağlamıştır. Dolayısıyla beton basınç dayanımının tahribatsız test metotlarıyla tahmin edilmesi zorlaşmıştır.

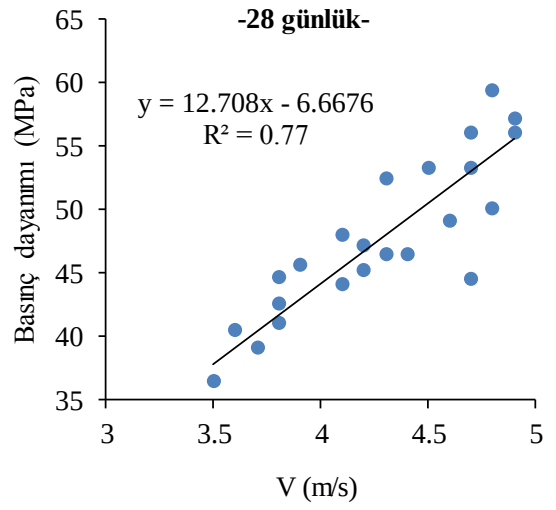
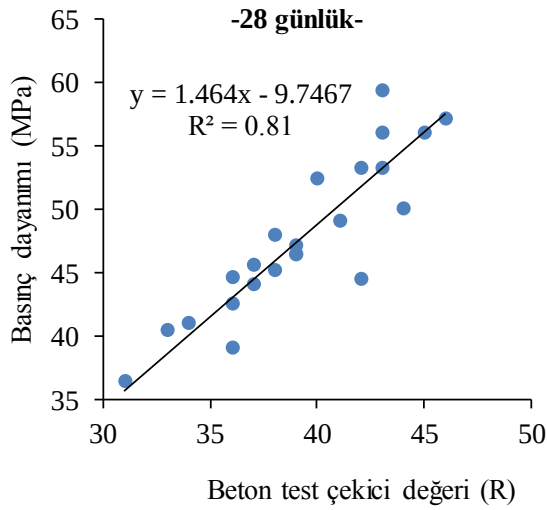
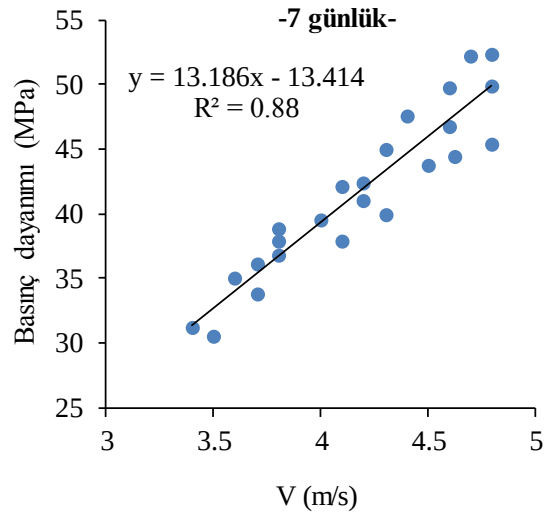
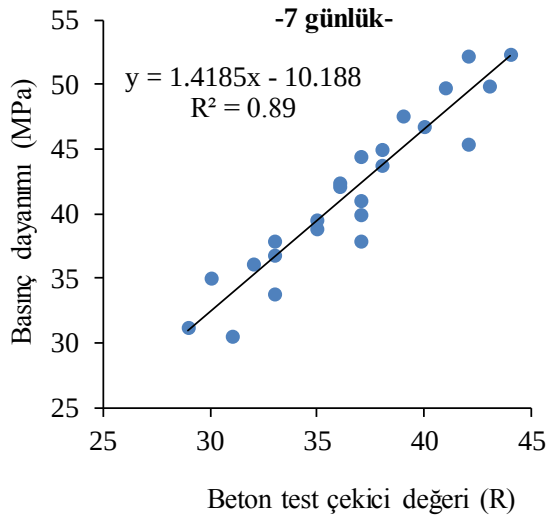
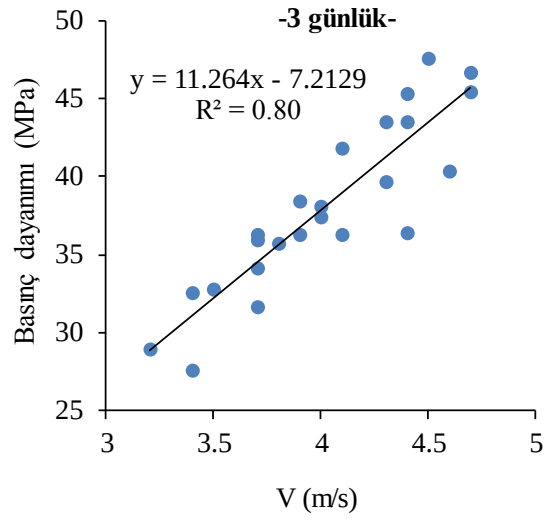
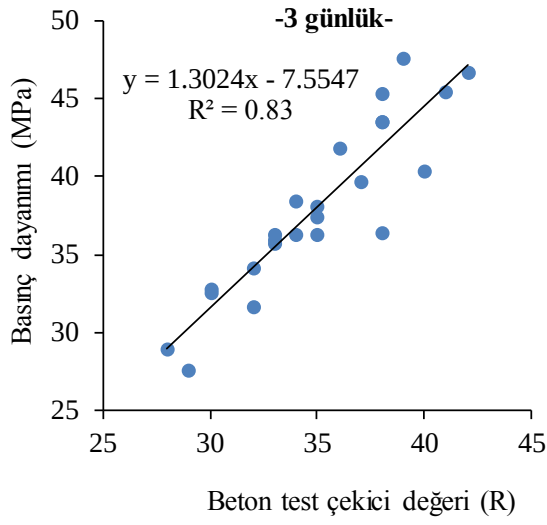
şekil 28’de beton basınç dayanımı ile R geri sıçrama değeri ve V dalga hızı arasındaki ilişkiler görölmektedir. 3, 7 ve 28 günlük betonlar için dayanım ilişkileri ayrı ayrı verilmiştir. Geri sıçrama (R) değerleri beton dayanımını tanımlamada (V) değerinden nispeten daha etkin olduğu görölmektedir.

şekil 29’de ise basınç dayanımı ile w uzunluğu arasındaki ilişki görölmektedir. Probun dışarıda kalan kısmının uzunluğu, w ile sembolize edilmiştir. Dolayısıyla beton dayanımı arttıkça prob betona daha az battığından, probun dışarıda kalan kısmının boyu artmaktadır. Her üç tahribatsız metoda ait test sonuçları incelendiğinde kabul edilebilir sonuçlar elde edildiği görölmektedir. Ancak tek başlarına beton dayanımını tespit etmeye yeterli değildirler.

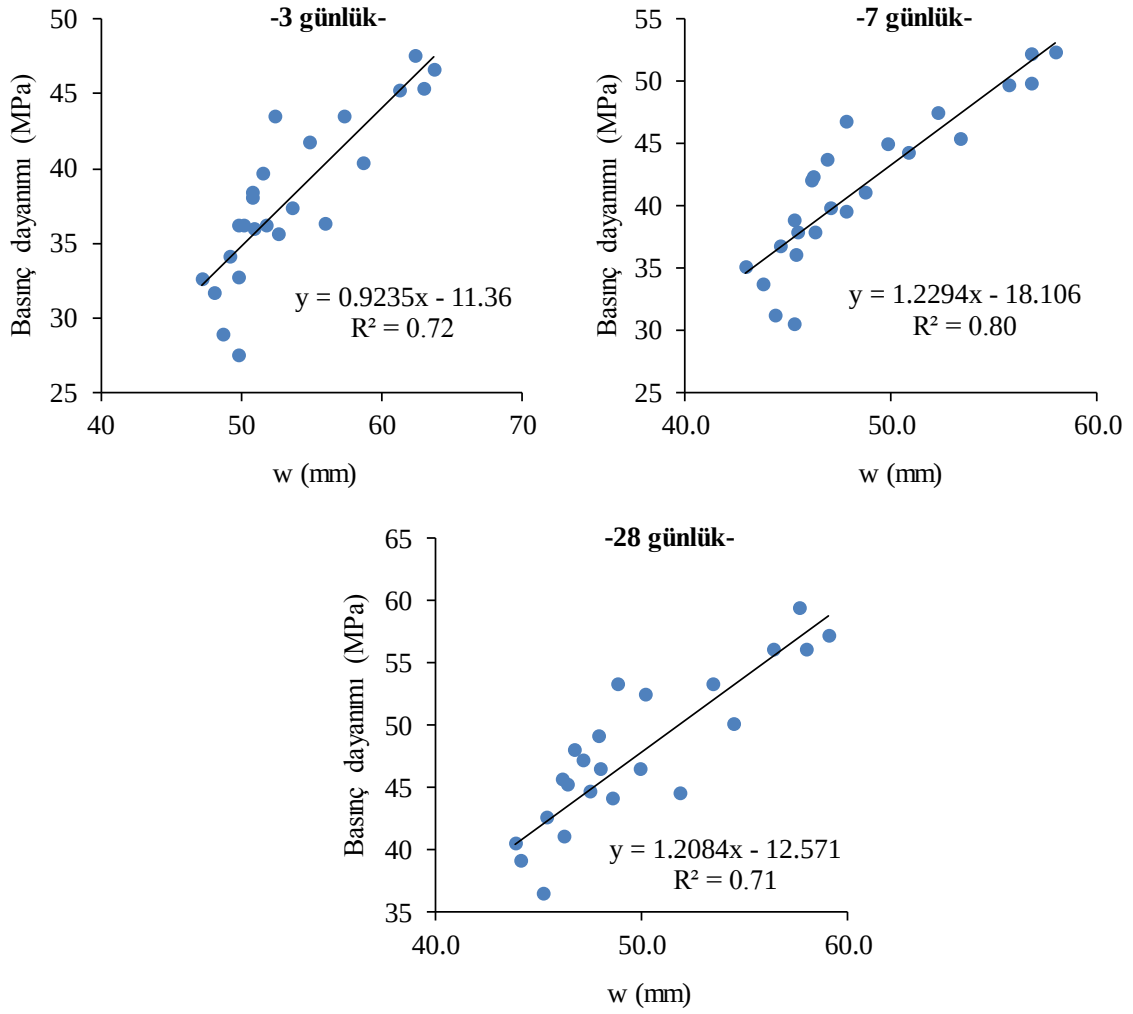
Beton test çekici sonuçları incelendiğinde, 3, 7 ve 28 günlük testlerin doğru tahmin oranları sırasıyla 0,83-0,89 ve 0,80'dir. Ultrases geçiş hızı testi değerleri de beton test çekicine yakındır; 3, 7 ve 28 günlük testlerin doğru tahmin oranları sırasıyla 0,80-0,88 ve 0,77'dir. Windsor prob testinin basınç dayanımı ile ilişkisi incelendiğinde tahmin oranlarının nispetten beton test çekici ve ultrases geçiş hızı testlerine göre daha düşüktür; 3, 7 ve 28 günlük testlerin doğru tahmin oranları sırasıyla 0,72-0,80 ve 0,71'dir. Bunun sebebi, windsor prob testinin betonun bileşiminden diğer testlere göre daha fazla etkilenmesidir.

Tablo 13. Üçüncü adım beton serilerinin tahribatsız test sonuçları.

Seri Adı	3 günlük				7 günlük				28 günlük			
	R	V	w*	f _c	R	V	w	f _c	R	V	w	f _c
16-1	33	3,8	52,6	35,7	35	4,0	47,8	39,6	37	4,1	48,6	44,2
16-2	30	3,5	49,8	32,8	32	3,7	45,4	36,2	34	3,8	46,2	41,1
16-3	30	3,4	47,2	32,6	30	3,6	42,9	35,1	33	3,6	43,9	40,6
16-4	28	3,2	48,7	29,0	29	3,4	44,4	31,3	31	3,5	45,2	36,5
16-5	37	4,3	51,5	39,7	38	4,5	46,9	43,8	41	4,6	47,9	49,2
16-6	34	3,9	50,7	38,4	36	4,1	46,1	42,1	38	4,1	46,7	48,1
16-7	33	3,7	49,8	36,3	35	3,8	45,3	38,9	37	3,9	46,1	45,7
16-8	32	3,7	49,1	34,2	33	3,8	44,6	36,8	36	3,8	45,4	42,6
16-9	39	4,5	62,4	47,6	42	4,7	56,8	52,2	43	4,8	57,6	59,5
16-10	38	4,4	61,2	45,3	41	4,6	55,7	49,8	43	4,7	56,4	56,2
16-11	38	4,3	57,3	43,5	39	4,4	52,3	47,6	42	4,5	53,4	53,3
16-12	36	4,1	54,8	41,8	38	4,3	49,8	45,0	40	4,3	50,2	52,5
32-1	35	4,0	53,6	37,4	37	4,2	48,8	41,1	39	4,3	49,9	46,5
32-2	33	3,7	50,9	36,0	33	3,8	46,3	37,9	36	3,8	47,5	44,8
32-3	32	3,7	48,1	31,7	33	3,7	43,8	33,8	36	3,7	44,1	39,2
32-4	29	3,4	49,8	27,6	31	3,5	45,3	30,6	33	3,6	46,2	34,5
32-5	38	4,4	52,3	43,5	40	4,6	47,8	46,8	43	4,7	48,8	53,3
32-6	35	4,1	51,7	36,3	37	4,3	47,0	39,9	39	4,4	48,0	46,5
32-7	35	4,0	50,8	38,1	36	4,2	46,2	42,4	39	4,2	47,1	47,2
32-8	34	3,9	50,1	36,3	37	4,1	45,5	37,9	38	4,2	46,4	45,3
32-9	42	4,7	63,7	46,7	44	4,8	57,9	52,4	46	4,9	59,1	57,2
32-10	41	4,7	62,9	45,4	43	4,8	56,8	49,9	45	4,9	58,0	56,1
32-11	40	4,6	58,7	40,4	42	4,8	53,3	45,4	44	4,8	54,4	50,2
32-12	38	4,4	55,9	36,4	37	4,62	50,8	44,4	42	4,7	51,8	44,6
*Windsor prob testi düşük güçle yapılmıştır.												



Şekil 28. Beton dayanımı ile R ve V arasındaki ilişkiler.



Şekil 29. Beton dayanımı ile w (mm) arasındaki ilişkiler.

Kalıp alma sürelerinin önemli olduğu inşaatlarda kritik sürelerde beton dayanımının tespit edilmesi gerekir. Beton karışım oranlarının ve karışıma giren malzemelerin değişmemesi hesap işlerini kolaylaştırır da hava ve taze beton sıcaklığının değişimi, istenilen sürelerde yerinde beton basınç dayanımının tahminini zorlaştırır. Özellikle sıcaklık değişimleri ve az da olsa çimentonun kimyasal bileşimindeki küçük değişiklikler beton basınç dayanımında önemli değişikliklere neden olabilirler.

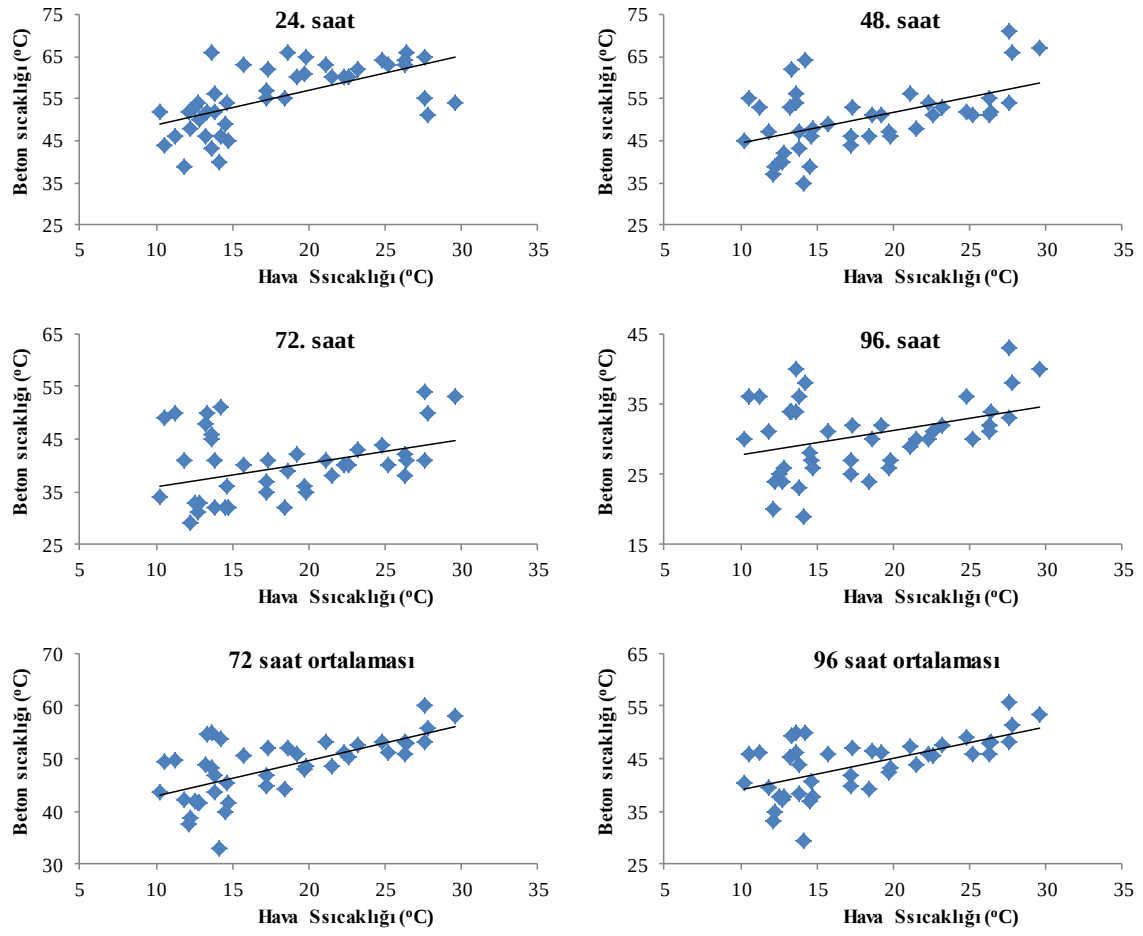
Köprü, tünel, ön gerilmeli imalatlar ve toplu konutlarda iş planına göre hedeflenmiş bir kalıp alma süresi vardır. Bu hedef sürenin uzaması işin uzaması ve dolayısıyla ek maliyet anlamı taşımaktadır. Bu nedenle hedeflenen sürenin sonunda beton dayanımı kontrol edilir ve hedef beton dayanımına ulaşılmışsa kalıp sökülerek imalata devam edilir. Eğer beton istenilen dayanıma ulaşmamışsa, belirli periyotlarla dayanım kontrol edilir ve hedeflenen beton dayanımı elde edildiğinde imalata devam edilir.

Hedeflenen ilk süre sonunda ve nihai dayanımın belirlenmesi için standart beton numuneler alınarak dayanım kontrol edilir. Ancak burada sıkça iki problemle karşılaşılır. Birincisi; şantiye şartları ile laboratuvar şartları aynı değildir. İkincisi ise çok sayıda numune almak ve bu numuneleri muhafaza ederek, deney yapmak, ilave iş yükü ve maliyet getirmektedir.

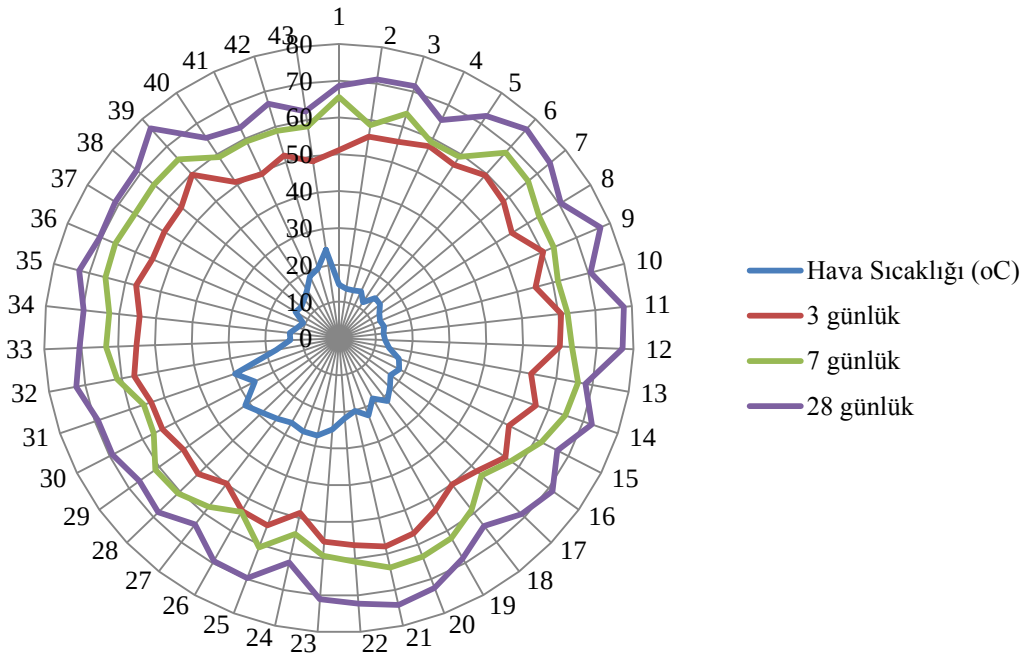
Şantiye ve laboratuvar şartlarının aynı olmamasının en büyük nedeni hava sıcaklığı, nem ve rüzgâr gibi dış hava şartları ve kür koşullarıdır. Betonun yerinde, yeterince kür edildiği kabul edilse bile, hava sıcaklığı ve taze beton sıcaklığı beton dayanımını önemli derecede etkileyen parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır. Tablo 9 yardımıyla elde edilen Şekil 30'da yer alan grafiklerde hava sıcaklığı ile taze beton sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Şekil 30'da taze betondan beton kalıba yerleştirildikten 24, 48, 72 ve 96 saat sonraki sıcaklıklar ile 72 ve 96 saat sonraki ortalama sıcaklıklar ile hava sıcaklığı arasındaki yaklaşık ilişki görülmektedir. Hava sıcaklığı beton döküm anına aittir. Kömürhan Köprüsü pilon betonları bir yılı aşkın devam etmiştir. Dolayısıyla hava sıcaklığı 10 °C ile 30 °C aralığında değişmektedir. İlk üç gündeki beton sıcaklığı ise yaklaşık 30 °C ile 60 °C aralığında değişmektedir. Betonun iç sıcaklığı zaman ilerledikçe azalmaktadır. Bu değişim beton dayanım kazanma hızını oldukça etkilemektedir.

Beton dayanım kazanma mekanizması birçok faktöre bağlı karmaşık bir reaksiyondur. Dolayısıyla betonun dayanımını belirlemenin en iyi yolu numune alıp, tahribatlı yöntem ile dayanımını tespit etmektir. Eğer bu uygulanmayacaksa veya başka bir yöntem kullanılmak isteniyorsa, görülmektedir ki betonun sadece bir özelliğinin dikkate alınarak dayanımının belirlenmesi önemli hatalara yol açabilir. Yani sadece yüzey sertliği, sadece ultrases geçiş hızı veya sadece olgunluk metodu beton dayanımını tahmin etmede, tatmin edici olmayabilir.

Şekil 31'de, Tablo 7'den faydalanılarak, beton döküm sırasındaki hava sıcaklıkları ile 3, 7 ve 28 günlük beton basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmiştir. Beklendiği gibi betonun yaşı ilerledikçe basınç dayanımı artmıştır. Ancak bütün serilerde hava sıcaklığı için aynı ilişkiden söz etmek mümkün değildir. Yani hava sıcaklığının yüksek olduğu günlerde dayanım daima yüksek veya hava sıcaklığının düşük olduğu günlerde beton dayanımı daima düşük bir eğilim göstermemiştir. Belli ki hava sıcaklığının yanında başka faktörlerde beton basınç dayanımını etkilemektedir.



Şekil 30. Kömürhan Köprüsü pilon betonlarında hava sıcaklığı ile taze beton sıcaklıkları arasındaki ilişki.



Şekil 31. Kömürhan Köprüsü pilon betonlarında hava sıcaklığı ile beton dayanımları arasındaki ilişki.

Şantiye sahasında üretilen bir betonun basınç dayanımının belirlenmesinde kullanılan en etkin yöntem, standart numuneler kullanılarak basınç testi yapılmasıdır. Ancak maliyet, zaman ve iş gücü tasarrufu bakımından sınırlı sayıda numune alınmaktadır. Bu nedenle ilave olarak tahribatsız test yöntemleri kullanılmaktadır. Tahribatsız test yöntemlerinin her birinin ayrı avantaj ve dezavantajları vardır. Bu nedenle tek başlarına, beton dayanımının tahmin edilmesi konusunda istenilen başarılı sonuçları vermemektedirler. Ancak doğru şartlar altında, uyumlu tahribatsız test metotları beraber kullanıldığında ve sonuçları ortak (kombine) bir şekilde değerlendirildiklerinde, beton dayanımının tahmini konusunda başarılı performanslar görülmektedir.

Bu tez çalışmasının 6. Bölümünde hem Kömürhan Köprüsü kule betonları için hem de genel uygulanabilir kombine metotlar üzerinde çalışılmıştır.

6. KOMBİNE METOTLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Tahribatsız test metotları betonun yerinde dayanımını tahmin etmek için her zaman yeterli olmamaktadırlar. Tek başlarına tahmin ettikleri dayanım değerinin doğruluğu oldukça düşük olabilmektedir. Bu olumsuz durumun giderilmesi için kombine metot çalışmaları literatürde önerilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında üç adımda gerçekleştirilen deneysel çalışmaların verileri kullanılarak kombine metotlar geliştirilecektir. Bu kombine metotlar geliştirilirken istatistiksel metotlardan tepki yüzeyi metodu kullanılacaktır.

6.1. Tepki Yüzeyi Metodu

Deneysel çalışmaların önemli bir çoğunluğu üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; a) Deneyin planlanması, b) Deneyin uygulanması ve c) Elde edilen sonuçların analizi ve yorumlanmasıdır. Özellikle çok sayıda deney yapılmış ve birçok farklı parametre dikkate alınmış ise bu deneylerin sonuçlarını analiz etmek, birbirleri üzerindeki etkilerini belirlemek oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Betonla ilgili deneyler dikkate alındığında, betonun birçok farklı özelliği için deneyler yapılmaktadır. Örneğin taze beton özelliklerinin belirlenmesi için çökme, yayılma, ayrışma gibi deneyler yapılmaktadır. Benzer şekilde sertleşmiş beton özelliklerinin belirlenmesi için basınç, yarma, eğilme gibi deneyler yapılmaktadır. Hatta sertleşmiş beton için birde betonun yaşı değişkeni devreye girmektedir. Tüm bu taze ve sertleşmiş beton özellikleri üzerinde, su/çimento oranı, çimento miktarı, çimento tipi, agrega granülometrisi, agrega dayanımı, en büyük agrega tane çapı, agrega/çimento oranı, kimyasal katkı oranı, mineral katkı tipi ve mineral katkı oranı gibi birçok faktör etkilidir. Bu faktörlerin ikili ve çoklu etkilerinin belirlenmesi ancak uygun istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmesi mümkündür [107].

Son yıllarda yapılan çalışmalar incelendiğinde beton ile ilgili araştırmalarda tepki yüzeyi metodunun beton teknolojisi konusunda başarı ile uygulandığı görülmektedir. Örneğin, kendiliğinden yerleşen beton karışımların karışım tasarımının yapılmasında veya mineral katkı ile üretilmiş betonların yüksek sıcaklık etkilerinin belirlenmesinde etkin bir yöntem olduğu ve yüksek doğruluklu tahminler sağladığı araştırmacılar

tarafından ortaya konulmuştur. Bu nedenle, bu tez çalışmasında elde edilen deneysel sonuçların tepki yüzeyi metodu ile analiz edilmesine karar verilmiştir [108].

Tepki yüzeyi metodolojisi, 1951 yılında kimya endüstrisinde üretim işlemlerinin geliştirilmesine yardımcı olmak için Box ve Wilson tarafından geliştirilmiştir. Amaç, düşük sıcaklıkta yüksek verim ve saflık elde etmek için kimyasal reaksiyonları optimize etmektir. Bu, sıcaklık, basınç, reaksiyon süresi ve reaktiflerin oranı gibi faktörleri içeren sıralı deneylerin kullanılmasıyla başarılmıştır [109].

Tepki yüzeyi metodunda elde edilmek istenen nihai özellik, tepki veya yanıt olarak isimlendirilir. Tepkiyi etkileyen her parametre ise faktör olarak adlandırılır. Örneğin, su/çimento oranı ve agrega/çimento oranının (her ikisinin birlikte etkisi), betonun basınç dayanımı üzerine etkisi belirlenmek isteniyorsa, burada beton basınç dayanımı; tepki (yanıt), su/çimento oranı ve agrega/çimento oranı ise iki ayrı faktördür [107].

Tepki yüzeyi metodolojisi, süreçleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için faydalı olan istatistiksel ve matematiksel bir tekniktir. Bir tepki sadece bir faktöre bağlıysa ve birçok deney sonucu mevcut ise uygun bir eğri uydurma yöntemi ile aralarındaki ilişki matematiksel olarak belirlenebilir. Yani bu ilişkiye ait bir denklem oluşturulabilir. Ancak bir tepki iki faktöre bağlıysa, bu tepki ile faktörler arasındaki matematiksel ilişki, bir yüzey oluşturur. Bu yüzeyin matematiksel ifadesini en iyi tespit eden yöntemlerden biri tepki yüzeyi metodudur [109].

Tepki yüzeyi metodu, herhangi bir sisteme ait i sayıdaki faktöre (x) bağlı olarak meydana gelen tepkinin (y) ölçümü şeklinde ifade edilir. Bu durum matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$$

Yapılan denemelerde, hesaplanan y değeri ile hedeflenen y değeri arasında uyumsuzluk varsa, bu durum modelin hatası olarak kabul edilir ve β ile gösterilir. Böylece ortaya çıkan duruma ait matematiksel ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$y' = f(x) + \beta$$

Tepki yüzeyi modelleri, faktörler ve faktörlerin karşılıklı etkileşimlerini içeren çoğunlukla kuadratik (ikinci derece denklem) veya kübik (üçüncü derece) polinomal fonksiyonlar şeklindedir [108].

Tepki yüzeyi metodunun işlem basamakları şu şekilde sıralanabilir:

- a. Faktörlerin seçimi,
- b. Faktörler ve tepki arasındaki ilk ilişkinin belirlenmesi,

- c. Tepki formunun belirlenmesi (kodlu veya gerçek),
- d. Tepki ölçüm yönteminin seçilmesi,
- e. Modele ait denklemin belirlenmesi,
- f. Modelin denkleminin uygunluğunun test edilmesi ve hata oranlarının belirlenmesi,
- g. Sonuçların grafik haline getirilmesi.

Bu tez çalışmasında, tepki (yanıt) yani hedef, beton basınç dayanımıdır. Beton basınç dayanımının tahmin edilmesi için kullanılacak faktörler ise tahribatsız test metotlarıdır. Tepki yüzey metodunda en az iki olmak üzere ikiden fazla faktörün tepki üzerine etkisi başarı ile belirlenebilir. Ancak grafiklerde en fazla iki faktörün etkisi gösterilebilir. Tüm faktörlerin etkisi ancak ayrı ayrı pertürbasyon eğrilerinde görülmektedir.

Tepki formunun kodlu (0-1 arasında) veya gerçek olması elde edilecek denklemin nasıl kullanılacağını belirlemektedir. Formun gerçek değerlerle hazırlanması, denklemin kullanımını ve anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır [109].

1951 yılından günümüze, tepki yüzeyi metodu ile ilgili birçok gelişme yaşanmış ve birçok alt yöntem geliştirilmiştir. Her bir seri deneyin kaç tekrar yapıldığına ve farklı deney serisi sayısına göre uygun yöntem seçilmelidir. Genellikle deneme-yanılma yöntemi ile uygun alt yönteme karar verilmektedir. Bu tez çalışmasında, yüzey merkezli alt yöntem kullanılmıştır.

Uygun alt yönteme karar verildikten sonra yapılacak analizler, matematiksel denklemler oluşturmaya yönelik iteratif hesaplardır. Bu noktada, ilgili formüller yardımıyla MATLAB gibi bir programda gerekli yazılım hazırlanarak hesaplamalar yapılabilir. Ancak tüm bu işlemlerin detaylı bir şekilde gerçekleştirilmesi için geliştirilmiş hazır yazılımlar mevcuttur. Bunlardan biri Design Expert paket programıdır. Bu tez kapsamında elde edilen veriler, Design Expert programı yardımıyla analiz edilmiştir [110].

Analiz sonucunda birçok farklı fonksiyon geliştirilmektedir. Bu fonksiyonlardan anlamlılık değeri (R^2) en yüksek olan tercih edilmektedir. Daha sonra bu fonksiyon için ANOVA testi yapılmaktadır. ANOVA testi, varyans analizi olarak bilinmektedir. Varyans analizi iki ya da daha fazla gruba ait ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. Eğer geliştirilen

fonksiyon yani matematiksel model ve modelin içindeki terimler anlamlı ise geliştirilen fonksiyonun uygun ve kullanılabilir olduğuna karar verilir.

ANOVA testi sonuçlarından p ve F değerleri çok önemlidir. F değeri veri grubuna göre değişiklik gösterir ve Design Expert programı hangi veri aralığının uygun olduğunu ifade eder. Ancak p -değeri genel anlamlara sahiptir. p -değerinin 0,0001'den küçük olması anlamlılığın mükemmel olduğunu gösterir. p -değerinin 0,05'den küçük olması ise modelin önemli olduğunu ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğunu ifade eder [108].

Analiz sonuçları üç farklı grafik ile değerlendirilir. Bu grafiklerin ilki, iki boyutlu tepki yüzeyi grafiğidir. Bu grafiğin x ve y eksenleri faktörleri, grafiğin üzerindeki kontür çizgileri ise tepki (yanıt) değerlerini ifade ederler. Bu grafik yardımıyla, faktörlere değer verilerek, tepki değeri kolayca elde edilebilir. İkinci grafik ise üç boyutlu tepki yüzeyi grafiğidir. Bu grafiğin x ve y eksenleri faktörleri, z eksen ise tepki değerlerini göstermektedir. Bu grafik yardımıyla, faktörlerin tepki üzerindeki genel etkisi görülebilir ve sayısal değer belirlenebilir. Üçüncü grafik ise pertürbasyon eğrisidir. Bu grafiğin y eksen tepki değerlerini, x eksen ise faktörlerin kodlanmış değerlerini ifade ederler. Yani, x eksen -1 ile 1 arasında değişmektedir. Her bir faktör için en düşük değer; -1, en yüksek değer ise +1 ile temsil edilmiştir. Pertürbasyon eğrilerinin her biri başka bir faktörü ifade etmektedir. Bu eğriler yardımıyla, faktörün sayısal değerindeki değişimlerin, tepkiyi nasıl etkilediği açıkça görülmektedir. Böylece faktörlerin, tepki üzerindeki etkileri yorumlanabilir ve gerekli düzenleme ve optimizasyon çalışmaları yapılabilir.

6.2 Geliştirilen Kombine Metotlar

Bu tez çalışması kapsamında yapılan her üç adım deney setlerinden farklı kombine metotlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Her model için varyans analizi (ANOVA) yapılmış, p ve F değerleri modelin doğruluğunu ispatlamak için tespit edilmiştir. Modeller oluşturulurken Design Expert paket bilgisayar programından faydalanılmıştır.

MODEL-1: Bu model, Kömürhan Köprüsü pilon betonları dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilmiştir. Beton basınç dayanımı, beton test çekici (R) ve olgunluk indeksi (M) değerleri yardımıyla tahmin edilmektedir. Bu model, Tablo 10'da verilen 6 seri kullanılarak elde edilmiştir. Bu model için belirlenen değişkenler Tablo 14'de

tanımlanmıştır. Beton test çekici (R) değeri; A ve olgunluk indeksi (M) değeri; B olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 14’de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 15’de verilmiştir. p -değerinin 0,0001’den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaven, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 16’de matematiksel modele ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği basınç dayanımına rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p -değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p -değerlerinden model terimlerinin anlamlı, değerli ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 32 ve Şekil 33’de sırasıyla değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 32’de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 34’de pertürbasyon grafiği yardımıyla beton basınç dayanımı ile tahribatsız test metotları arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. Hem R hem de M değerleri arttıkça beton basınç dayanımının arttığı pertürbasyon eğrilerinden görülmektedir.

Tablo 14. Değişkenler ve değişim aralıkları.

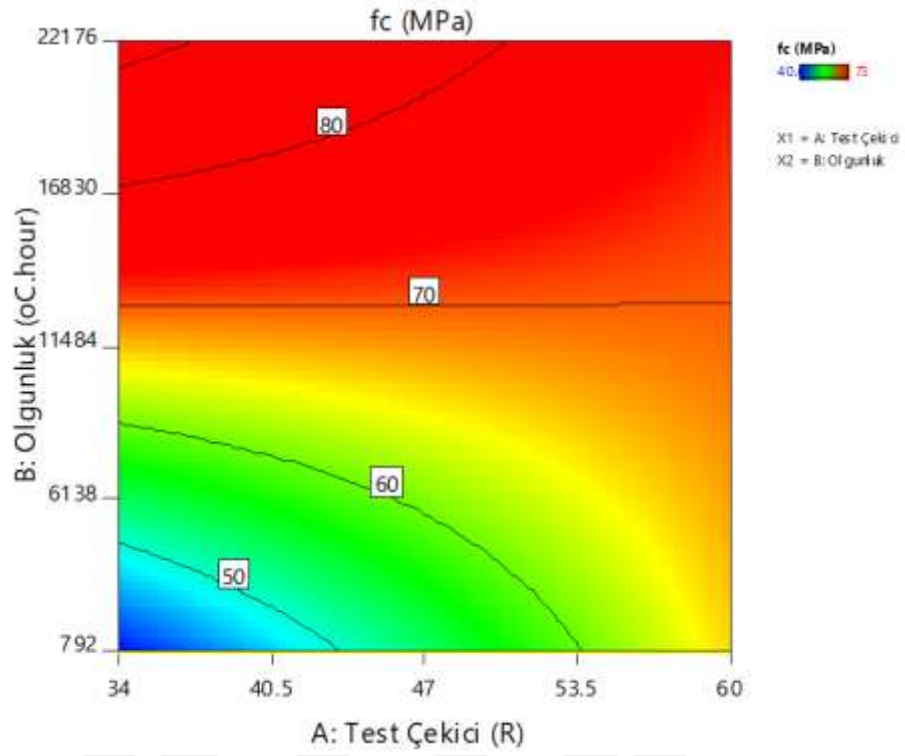
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
R	A	34	47	60
M	B	792	11484	22176

Tablo 15. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.

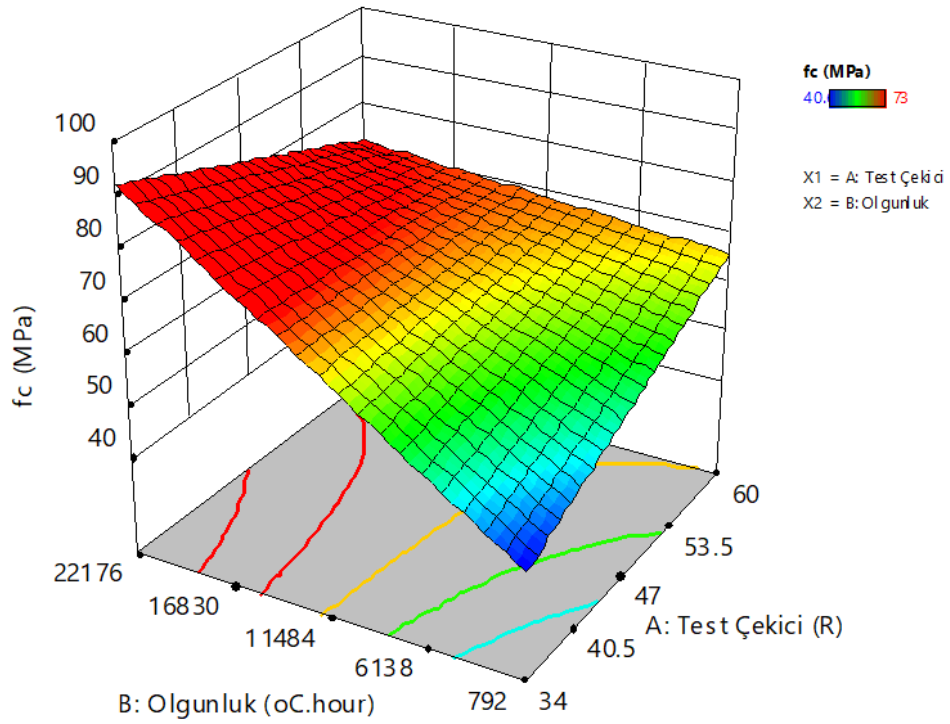
Modelin yanıtı	R^2	F-değeri	Modelin p-değeri
Basınç dayanımı	0,99	1398,32	<0,0001

Tablo 16. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.

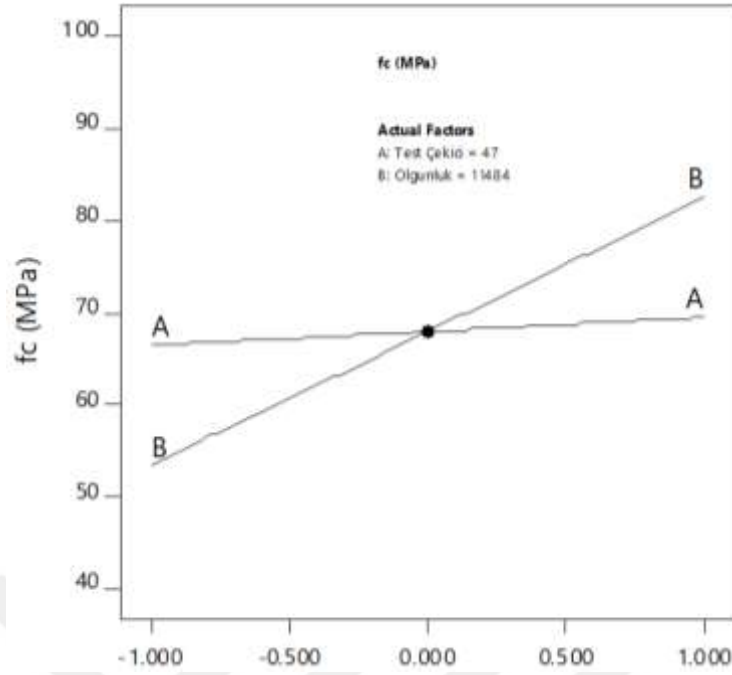
Modelin terimleri	Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri
A	1,19461	<0,0001
B	0,000011	0,8638
C (sabit)	1,4384	-



Şekil 32. Model-1'e ait iki boyutlu etki grafiği.



Şekil 33. Model-1'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.



Şekil 34. Model-1'e ait pertürbasyon grafiği.

MODEL-2: Bu model, Kömürhan Köprüsü pilon betonları dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilmiştir. Beton basınç dayanımı, beton test çekici (R) ve windsor prob (w) değerleri yardımıyla tahmin edilmektedir. Bu model, Tablo 12'de verilen 7 seri kullanılarak elde edilmiştir. Bu model için belirlenen değişkenler Tablo 17'de tanımlanmıştır. Beton test çekici (R) değeri; A ve windsor prob (M) değeri; B olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 17'de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 18'de verilmiştir. p -değerinin 0,0001'den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaveten, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 16'da matematiksel modele ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği basınç dayanımına rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p -değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p -değerlerinden model terimlerinin anlamlı, değerli ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 35 ve Şekil 36'da sırasıyla değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 35'de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 37'de pertürbasyon grafiği yardımıyla beton basınç dayanımı ile tahribatsız test metotları arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. Hem R

hem de w değerleri arttıkça beton basınç dayanımının arttığı pertürbasyon eğrilerinden görülmektedir.

Tablo 17. Değişkenler ve değişim aralıkları.

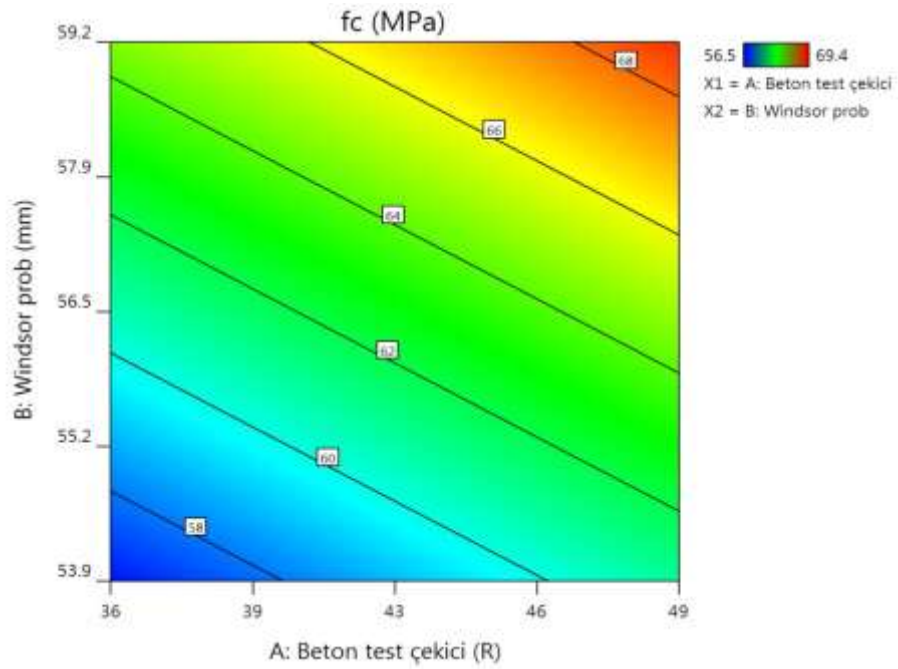
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
R	A	36	41,05	49
w	B	53,90	56,19	59,20

Tablo 18. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.

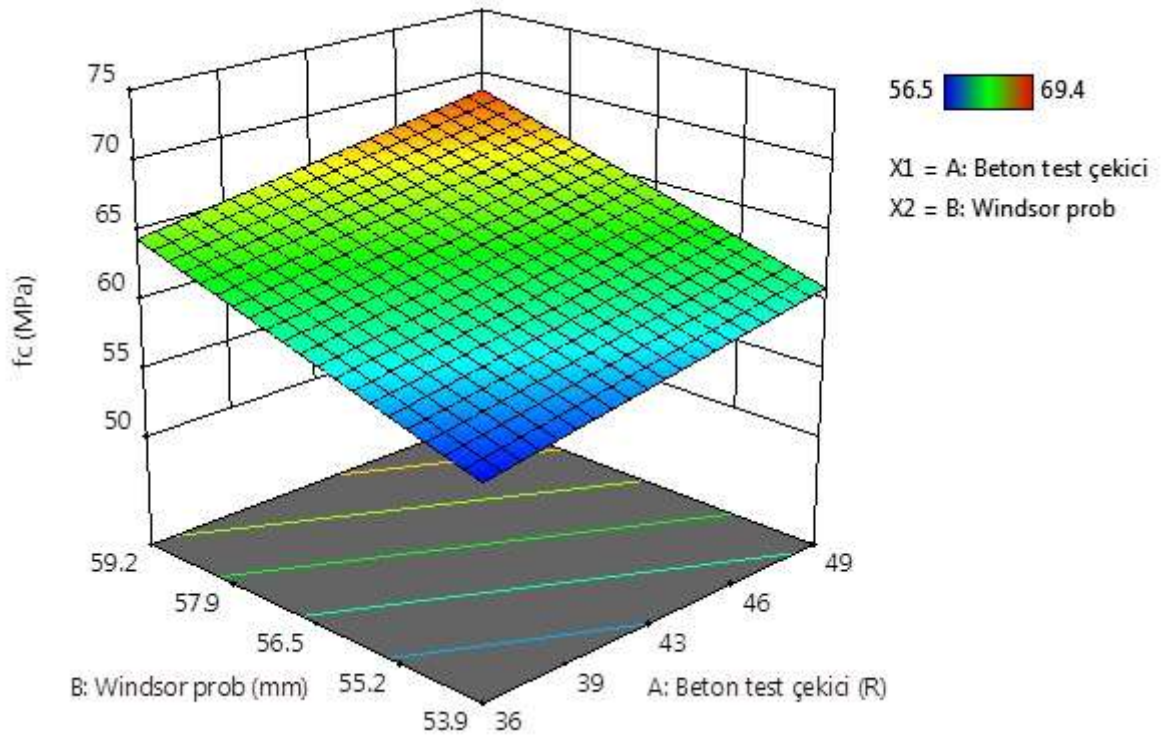
Modelin yanıtı	R^2	F-değeri	Modelin p-değeri
Basınç dayanımı	0,96	73,87	<0,0007

Tablo 19. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.

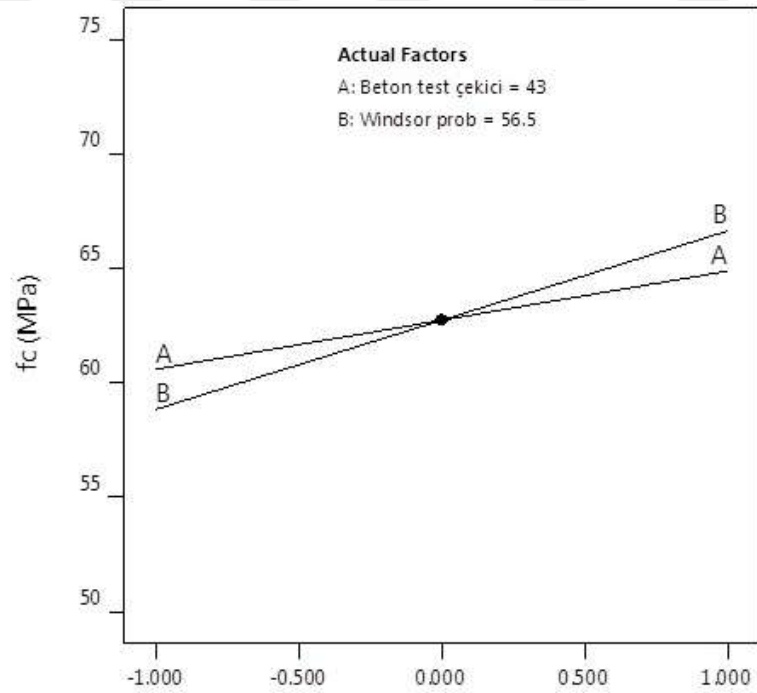
Modelin terimleri	Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri
A	0,330	0,4044
B	1,472	0,1767
C (sabit)	-34,478	-



Şekil 35. Model-2'ye ait iki boyutlu etki grafiği.



Şekil 36. Model-2'ye ait üç boyutlu yüzey tepkisi.



Şekil 37. Model-2'ye ait pertürbasyon grafiği.

MODEL-3: Bu model, Kömürhan Köprüsü pilon betonları dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı (V) ve olgunluk metodu (M) değerleri

yardımıyla tahmin edilmektedir. Bu model, Tablo 12’de verilen 7 seri kullanılarak elde edilmiştir. Bu model için belirlenen değişkenler Tablo 20’de tanımlanmıştır. Ultrases geçiş hızı (V); A ve olgunluk metodu (M) değeri; B olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 17’de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 21’de verilmiştir. p -değerinin 0,0001’den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaveten, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 19’da matematiksel modele ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği basınç dayanımına rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p -değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p -değerlerinden model terimlerinin anlamlı, değerli ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 38 ve Şekil 39’da sırasıyla değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 38’de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 40’da pertürbasyon grafiği yardımıyla beton basınç dayanımı ile tahribatsız test metotları arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. Hem V hem de M değerleri arttıkça beton basınç dayanımının arttığı pertürbasyon eğrilerinden görülmektedir.

Tablo 20. Değişkenler ve değişim aralıkları.

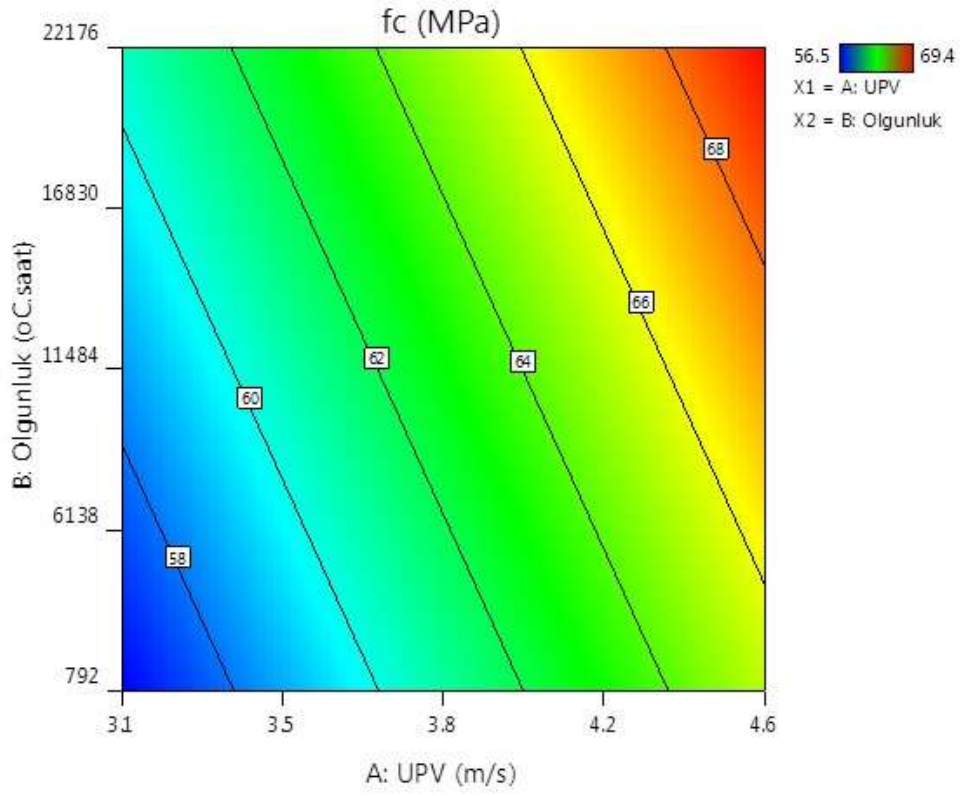
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
V	A	3,1	3,8	4,6
M	B	792	6788,57	22176

Tablo 21. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.

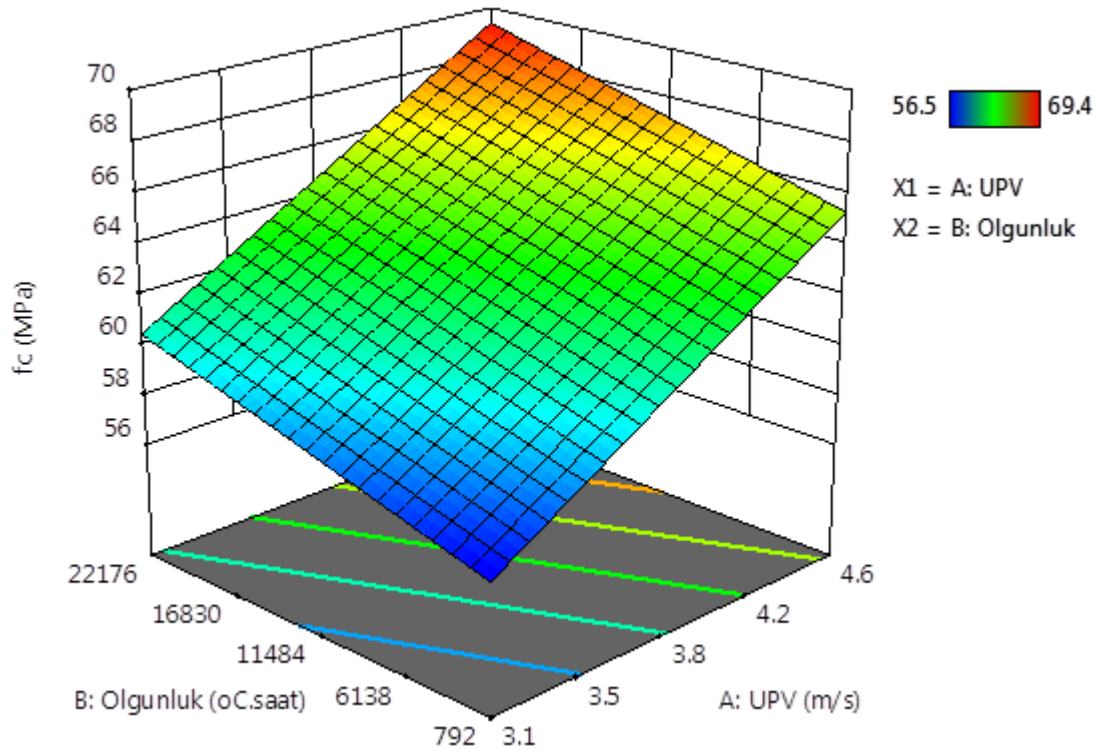
Modelin yanıtı	R^2	F-değeri	Modelin p -değeri
Basınç dayanımı	0,98	351,50	<0,0001

Tablo 22. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.

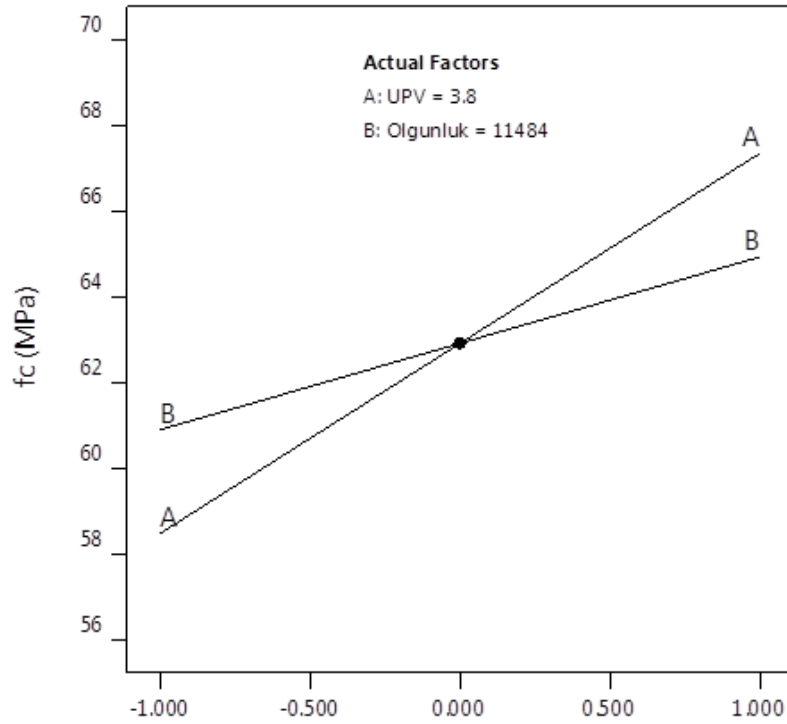
Modelin terimleri	Basınç dayanımı	
	Katsayı	p -değeri
A	5,9154	0,0010
B	0,000189	0,0211
C (sabit)	+37,969	-



Şekil 38. Model-3'e ait iki boyutlu etki grafiği.



Şekil 39. Model-3'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.



Şekil 40. Model-3'e ait pertürbasyon grafiği.

MODEL-4: Bu model, Kömürhan Köprüsü pilon betonları dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilmiştir. Beton basınç dayanımı; olgunluk indeksi (M), beton test çekici (R) ve windsor prob (w) değerleri yardımıyla tahmin edilmektedir. Bu model, Tablo 12'de verilen 7 seri kullanılarak elde edilmiştir. Bu model için belirlenen değişkenler Tablo 20'de tanımlanmıştır. Olgunluk indeksi (M) değeri; A , beton test çekici (R) değeri; B ve windsor prob (w) değeri; C olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 23'de sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 24'de verilmiştir. p -değerinin 0,0001'den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaven, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 25'de matematiksel modele ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği basınç dayanımına rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p -değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p -değerlerinden model terimlerinin anlamlı, değerli ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 41 ve Şekil 42'de sırasıyla değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 41'de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 43'de pertürbasyon grafiği yardımıyla beton basınç

dayanımı ile tahribatsız test metotları arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. M , R ve w değerleri arttıkça beton basınç dayanımının arttığı pertürbasyon eğrilerinden görülmektedir.

Tablo 23. Değişkenler ve değişim aralıkları.

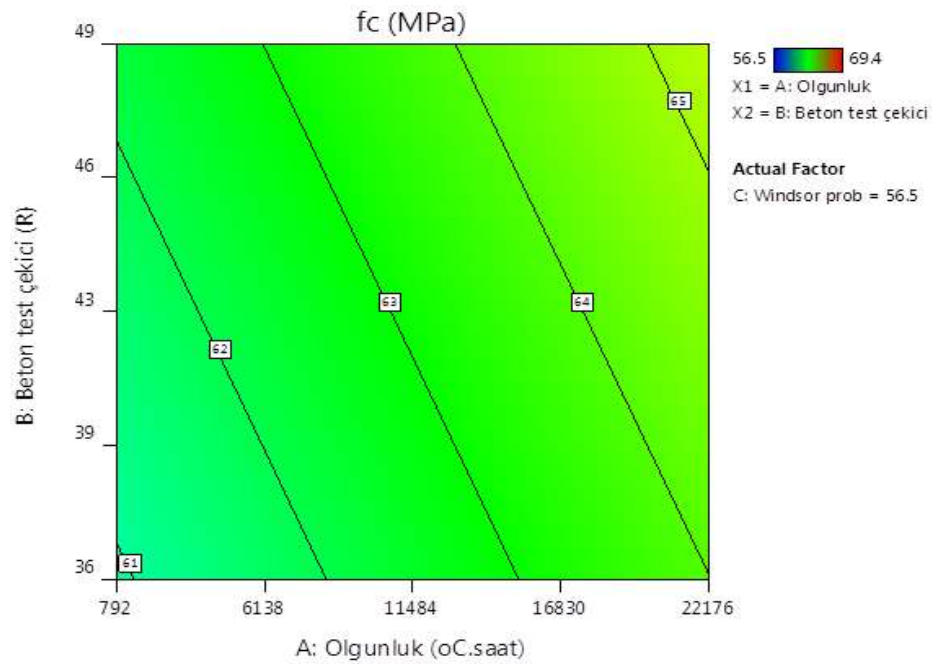
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
M	A	792	6788,57	22176
R	B	36	41,05	49
w	C	53,90	56,19	59,20

Tablo 24. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.

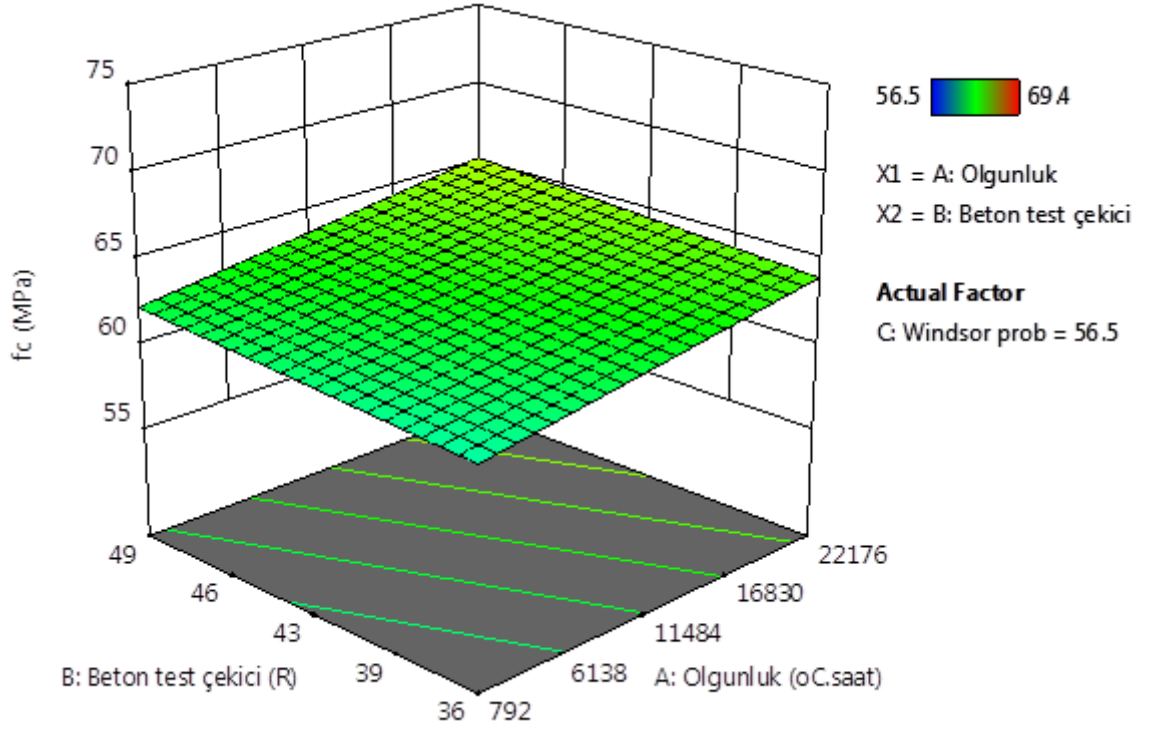
Modelin yanıtı	R^2	F-değeri	Modelin p-değeri
Basınç dayanımı	0,96	48,70	0,0048

Tablo 25. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.

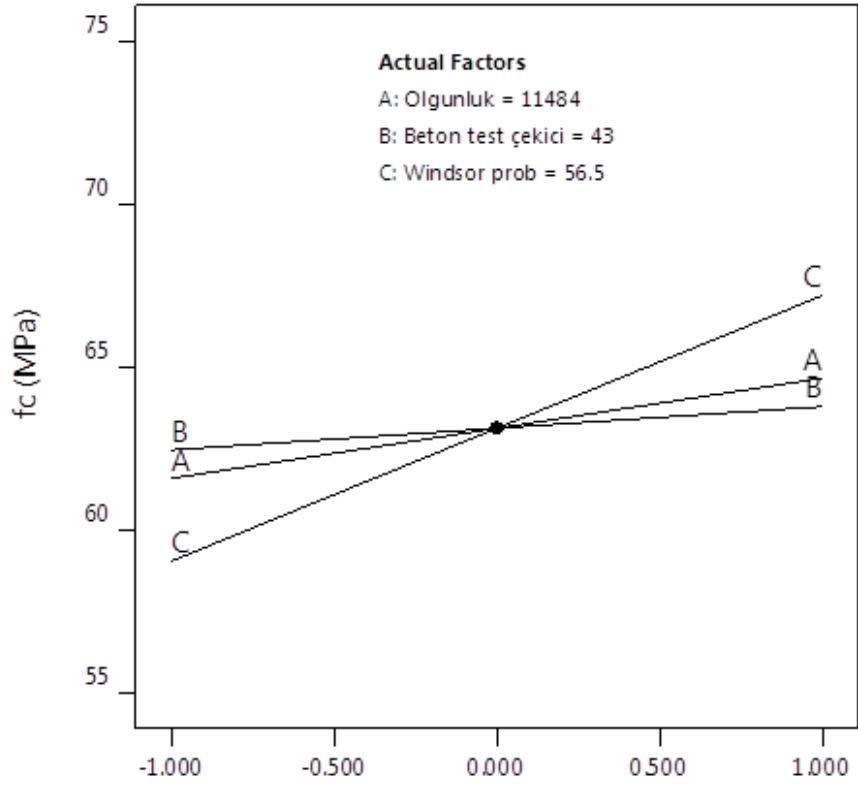
Modelin terimleri	Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri
A	0,000144	0,4060
B	0,10241	0,8265
C	1,54	0,1888
D (sabit)	-29,953	



Şekil 41. Model-4'e ait iki boyutlu etki grafiği.



Şekil 42. Model-4'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.



Şekil 43. Model-4'e ait pertürbasyon grafiği.

MODEL-5: Bu model, uygulamada sık kullanılan betonları dayanımlarının tahmin edilmesi için geliştirilmiştir. Bu model oluşturulana kadar birçok farklı model tasarlanmış ancak burada en uygun sonuç veren model sunulmuştur. Model 5’de beton basınç dayanımı; olgunluk indeksi (M), beton test çekici (R) ve windsor prob (w) değerleri yardımıyla tahmin edilmektedir. Bu model, Tablo 13’de verilen 72 seri kullanılarak elde edilmiştir. Her yaş grubu için 24 seri numune üretilmiştir. 3, 7 ve 28 günlük serilerin toplamı 72 adettir. Bu model için belirlenen değişkenler Tablo 26’da tanımlanmıştır. Beton test çekici (R) değeri; A , windsor prob (w) değeri; B ve olgunluk indeksi (M) değeri; C olarak sembolize edilmiştir. Bu değişkenlerin sayısal değerlerinin aralıkları da Tablo 26’da sunulmuştur.

Modelin ANOVA sonuçları ise Tablo 27’de verilmiştir. p -değerinin 0,0001’den küçük olması modelin anlamlı ve değerli olduğunu göstermektedir. İlaven, R^2 değerleri, modelin doğruluğu hakkında fikir vermektedirler. Tablo 28’de matematiksel modele ait katsayılar verilmiştir. Bu katsayılar kullanılarak, modelin tahmin ettiği basınç dayanımına rahatça ulaşılabilir. Model terimlerinin p -değerleri aynen modelin kendisinde olduğu gibi terimin anlam ve değerini ifade eder. p -değerlerinden model terimlerinin anlamlı, değerli ve kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır.

Model kuadratik bir modeldir. Modelin içerisinde bazı terimler, p -değerleri dikkate alınarak silinmiştir. Silinen bu değerler, sonucu 0,0001 oranında etkileyen terimlerdir. Hem etkisiz oldukları için hem de modelin sadeleşmesi için modelden bu etkisiz terimler kaldırılmıştır.

Şekil 44 ve Şekil 45’de sırasıyla değişkenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkisi iki ve üç boyutlu grafiklerde görülmektedir. Şekil 45’de yüzey tepkisi açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 46’da pertürbasyon grafiği yardımıyla beton basınç dayanımı ile tahribatsız test metotları arasındaki ilişki rahatlıkla anlaşılmaktadır. M , R ve w değerleri arttıkça beton basınç dayanımının arttığı pertürbasyon eğrilerinden görülmektedir.

Tablo 26. Değişkenler ve değişim aralıkları.

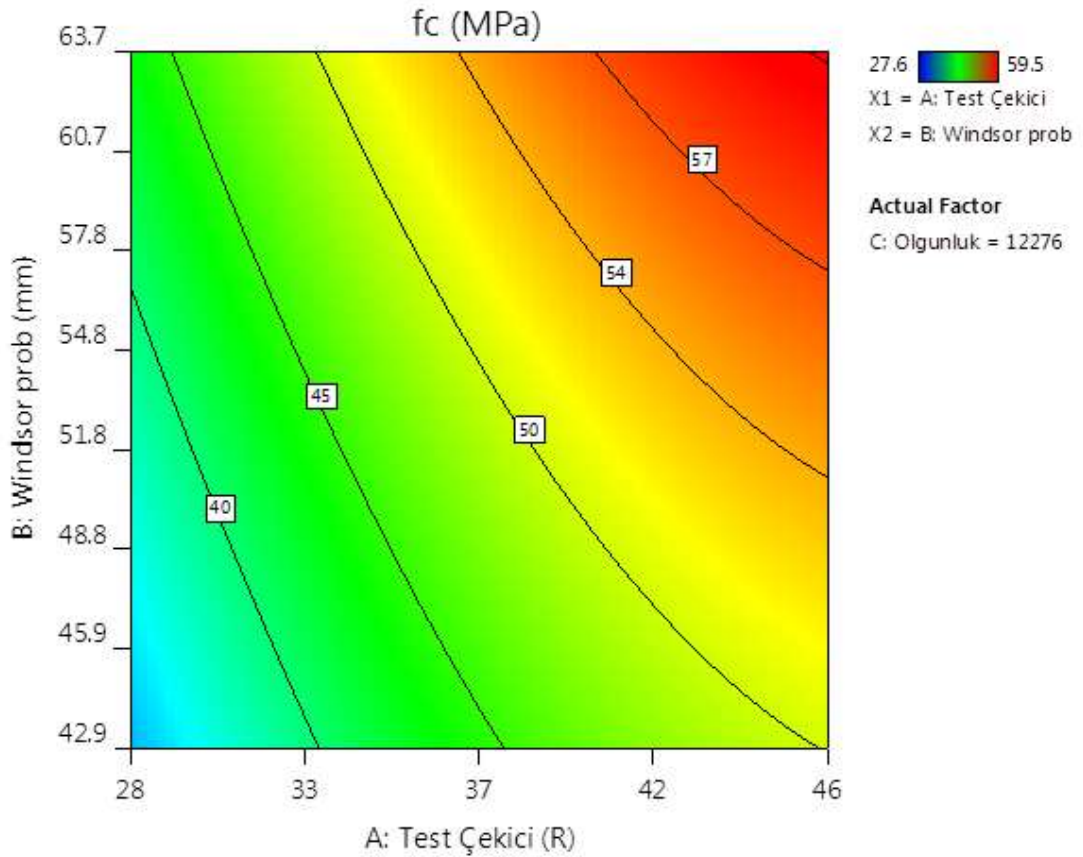
Semboller		Değişim aralığı		
Gerçek	Kod	-1	0	+1
R	A	28	36,85	46
W	B	42,90	50,56	63,70
M	C	2376	10032	22176

Tablo 27. Varyans analizinin (ANOVA) sonuçları.

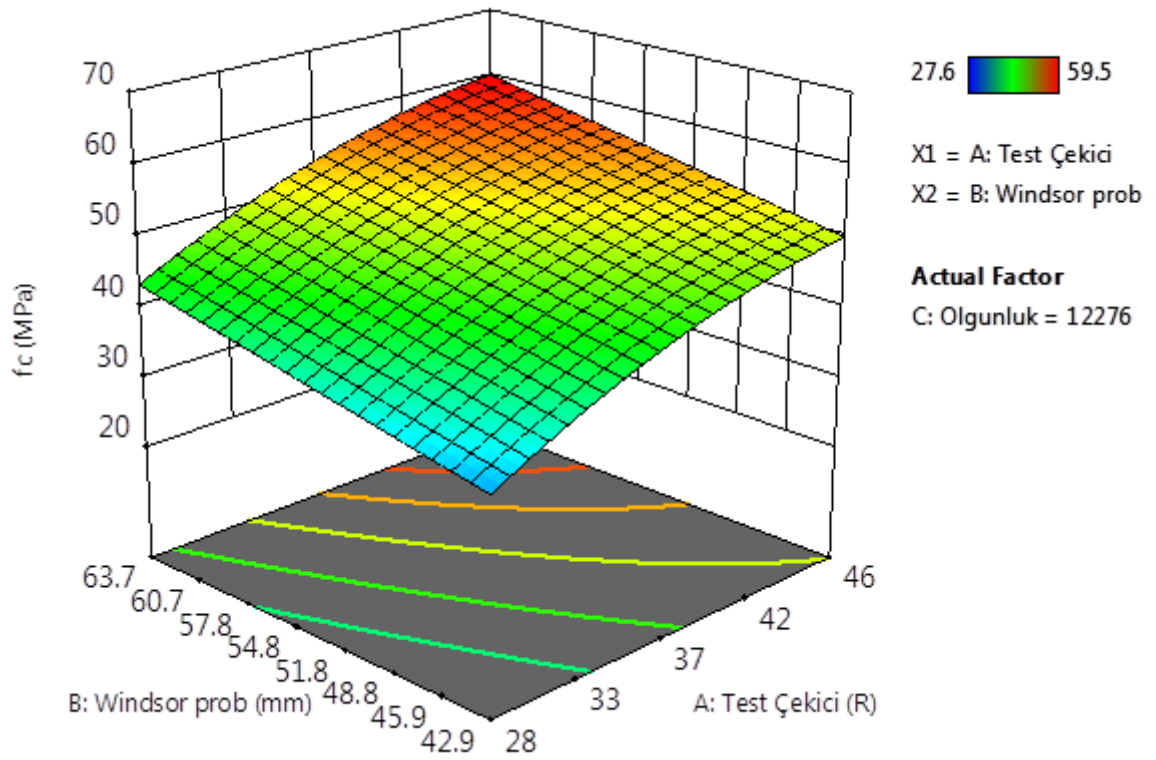
Modelin yanıtı	R ²	F-değeri	Modelin p-değeri
Basınç dayanımı	0,90	102,64	<0,00001

Tablo 28. Gerçek faktörlere göre geliştirilen modelin katsayıları ve ANOVA analizi sonuçları.

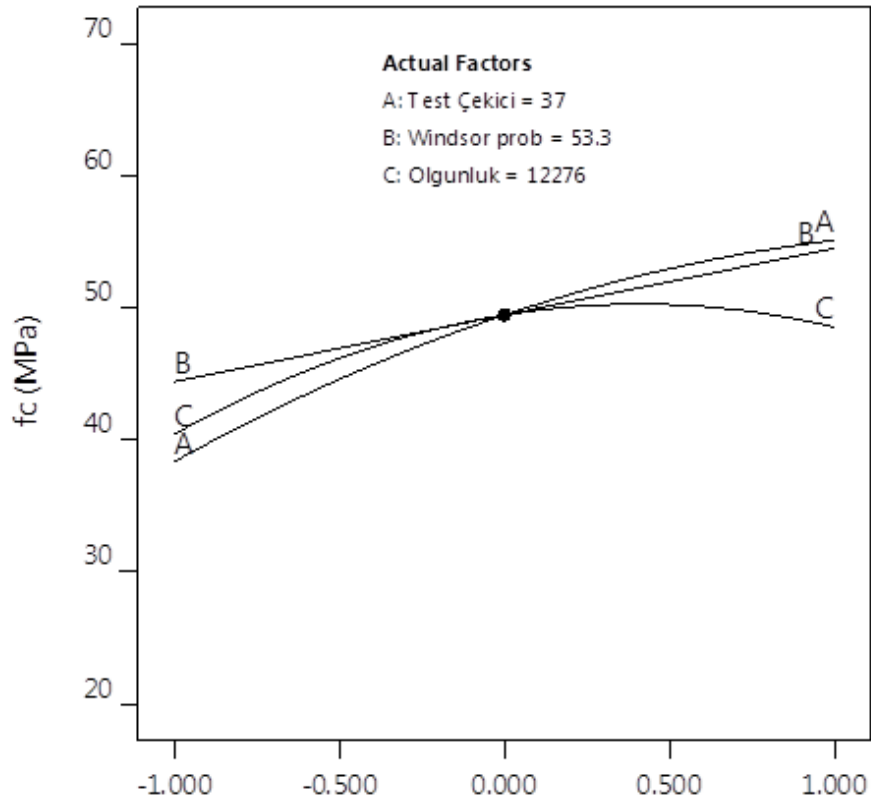
Modelin terimleri	Basınç dayanımı	
	Katsayı	p-değeri
A-Test çekici	+3,41914	< 0,00001
B-Windsor prob	+0,288389	0,0017
C-Olgunluk	+0,000801	< 0,00001
B×C	+0,000016	0,0608
A ²	-0,033626	0,0676
C ²	-5,07501E-08	0,0047
D (sabit)	-59,05964	



Şekil 44. Model-5'e ait iki boyutlu etki grafiği.



Şekil 45. Model-5'e ait üç boyutlu yüzey tepkisi.



Şekil 46. Model-5'e ait pertürbasyon grafiği.

6.3 Geliştirilen Kombine Metotların Kontrol Edilmesi

Geliştirilen kombine metotlardan Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4 Kömürhan Köprüsünün kule (pilon) betonlarının kontrolü için kullanılmıştır. Tablo 29’da Model-1 için bağıl hata oranları (BHO) yüzde olarak hesaplanmıştır.

Bölüm 6.2’de, geliştirilen modellere ait denklemlerin katsayıları, ilgili tablolarda verilmiştir. Bu tez kapsamında geliştirilen modellerin tamamında faktörlerin gerçek değerleri kullanılmıştır. Dolayısıyla, herhangi bir model yardımıyla beton dayanım tahmini yapılmak istenirse, ilgili tahribatsız metotlara ait gerçek değerler kullanılmalıdır. Geliştirilen modellere ait katsayılar, denklem formatında aşağıda sunulmuştur. Model-1, Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5’e ait tahminler için sırasıyla *Denklem 9*, *Denklem 10*, *Denklem 11*, *Denklem 12* ve *Denklem 13* kullanılmaktadır.

$$f_c^{Model-1} = 1,19461R + 0,000011M + 1,4384 \quad (9)$$

$$f_c^{Model-2} = 0,33R + 1,472w - 34,478 \quad (10)$$

$$f_c^{Model-3} = 5,9154V + 0,000189M + 37,969 \quad (11)$$

$$f_c^{Model-4} = 0,000144M + 0,10241R + 1,54w - 29,953 \quad (12)$$

$$f_c^{Model-5} = 3,41914R + 0,288389w + 0,000801M + 0,000016wM - 0,033626R^2 - 5,075 \times 10^{-8}M^2 - 59,05964 \quad (13)$$

Tablo 29. 3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-1'e göre basınç dayanımları.

Seri Adı	R	T (°C)	M (°C.saatt)	fc (MPa)		BHO (%)
				Deney	Model-1	
P 14 Sol	45	12,7	1634	55,1	54,7	-0,7
P 15 Sağ	45	12,2	1598	58,6	54,7	-7,2
P 16 Sağ	44	12,5	1620	58,7	54,0	-8,7
P 17 Sağ	44	13,8	1714	53	54,0	1,9
P 18 Sağ	43	17,2	1958	56,5	52,9	-6,7
P 19 Sol	41	18,4	2045	51,9	50,8	-2,2
P 20 Sağ	43	17,2	1958	55,6	53,0	-4,8
P 21 Sağ	40	19,2	2102	52	49,8	-4,5
P 22 Sağ	42	21,5	2268	50,2	51,1	1,8
P 23 Sol	43	19,7	2138	53,5	52,3	-2,3
P 24 Sol	45	21,1	2239	56,7	54,9	-3,3
P 25 Sol	43	23,2	2390	57,1	53,2	-7,4
P 26 Sol	44	22,3	2326	56,4	53,9	-4,6
P 27 Sol	44	22,6	2347	55,4	54,2	-2,1
P 28 Sol	45	26,3	2614	53,9	55,1	2,2
P 28 - A Sol	44	25,2	2534	54,4	53,9	-0,9
P 28 - C Sağ	45	26,4	2621	53,8	55,5	3,1
P 28 - D Sağ	45	26,3	2614	52,3	55,0	4,9
P 28 - B Sol	44	27,6	2707	53,1	54,4	2,3
P 28 - C Sol	45	29,6	2851	51,9	55,2	6,0
P 28 - E Sol	45	27,8	2722	53,9	55,5	3,0
P 28 - G Sol	44	27,6	2707	53,9	53,5	-0,8
P30	41	24,8	2506	53,4	50,1	-6,5
P31	43	17,3	1966	55	52,8	-4,1
P31 2. Kad.	43	13,2	1670	54,4	52,8	-3,0
P32 2. Kad.	43	10,5	1476	56,9	52,8	-7,7
P33 2. Kad.	41	10,2	1454	54	50,3	-7,3
P35 Ano	42	11,2	1526	55,5	52,2	-6,4
P36 Ano	43	13,8	1714	55,7	52,4	-6,3
P37 Ano	42	13,3	1678	55,6	51,6	-7,7
P38 Ano	42	14,2	1742	50,9	51,2	0,6
P39 Ano	41	15,7	1850	49,3	50,8	2,9
P40 Ano	44	18,6	2059	51,9	54,2	4,3
P41 Ano	43	19,8	2146	48,6	52,7	7,8

Olgunluk değerleri, beton anındaki ortalama döküm sıcaklığının üç gün boyunca değişmediği kabul edilerek hesaplanmıştır. Bağlı hata oranı *Denklem 14* kullanılarak belirlenmiştir.

$$BHO(\%) = \frac{Model - Deney}{Model} \times 100 \quad (14)$$

Bağlı hata oranları (BHO) incelendiğinde, negatif (-) değerler; Model-1'in deneysel değerlerden daha düşük değer, pozitif değerler ise Model-1'in deneysel değerlerden daha yüksek değer tahmin ettiğini göstermektedir. Tablo 29'da BHO değerlerinin tamamı %10 hata limiti içerisinde kalmaktadır. Bu sonuç Model-1'in yerinde erken yaş beton dayanımı tespit etmede başarılı olduğunu göstermektedir.

Geliştirilen Model-2 yardımıyla 3, 7 ve 28 günlük betonların basınç dayanımlarının kontrolü Tablo 30'da sunulmuştur. Model-2'nin en büyük hata oranı %18,1'dir. Ancak 7 ve 28 günlük değerlerin tahmininde neredeyse tüm hata oranları %10'un altındadır. Model-2'nin özellikle nihai dayanımların tespitini yüksek doğrulukla yapabildiği görülmektedir.

Tablo 30. 3, 7 ve 28 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-2'ye göre basınç dayanımları.

Seri Adı	3 günlük			7 günlük			28 günlük		
	Deney	Model-2	BHO (%)	Deney	Model-2	BHO (%)	Deney	Model-2	BHO (%)
P 14 Sol	55,1	61,3	10,1	61,4	66,8	8,2	70,6	68,7	-2,8
P 20 Sağ	55,6	60,6	8,2	57,4	64,8	11,5	71,3	67,1	-6,3
P 25 Sol	57,1	60,3	5,3	63,8	65,3	2,3	74,2	67,9	-9,3
P 28 - C Sol	51,9	61,0	15,0	61,3	65,6	6,6	66,6	67,6	1,5
P37 Ano	55,6	59,0	5,7	65,3	64,9	-0,6	70,6	68,1	-3,7
P41 Ano	48,6	59,3	18,1	58,2	64,6	9,9	62,3	67,2	7,3

Model-3'e ait beton dayanımı sonuçları ve bağlı hata oranları Tablo 31'de verilmiştir. En büyük hata oranı %16,9'dur. Hata oranlarının %20'nin altında olması bu modelin kabul edilebilir yönüdür. Ancak UPV testinden dolayı deneyin nem hassasiyeti yüksektir. Bu model kullanılırken, beton yüzey neminin de tespit edilmesinin oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Tablo 31. 3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-3'e göre basınç dayanımları.

Seri Adı	3 günlük			V (m/s)	M (°C.saatt)
	Deney	Model-3	BHO (%)		
P 14 Sol	55,1	59,6	7,5	3,6	1634
P 20 Sağ	55,6	59,0	5,8	3,5	1958
P 25 Sol	57,1	59,1	3,4	3,5	2390
P 28 - C Sol	51,9	60,4	14,1	3,7	2851
P37 Ano	55,6	59,6	6,7	3,6	1678
P41 Ano	48,6	58,5	16,9	3,4	2146

Model-4'de, Model-1, Model-2 ve Model-3'den farklı olarak üç tahribatsız test metodunun kullanıldığı bir kombine metot geliştirilmiştir. Tablo 32'de Model-4'e ait BHO'lar incelendiğinde, bu modelin üç günlük beton dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin edebildiği görülmektedir. Bu Model'in en büyük avantajı kullanılan tahribatsız test metodlarının birbirlerinin eksik yönlerini tamamlamalarıdır. Bu sayede yüksek doğruluklu sonuçlar tahmin edilebilmektedir.

Tablo 32. 3 günlük pilon betonlarının deneysel ve geliştirilen Model-4'e göre basınç dayanımları.

Seri Adı	R	w	M	Deney	Model-4	BHO (%)
P 14 Sol	45	55,1	1634	55,1	59,7	7,8
P 20 Sağ	43	54,9	1958	55,6	59,3	6,2
P 25 Sol	43	54,7	2390	57,1	59,0	3,3
P 28 - C Sol	45	53,1	2851	51,9	56,8	8,7
P37 Ano	42	54,3	1678	55,6	58,2	4,5
P41 Ano	43	51,3	2146	48,6	53,8	9,6

Model-5, genel amaçlı kullanılmak üzere geliştirilmiş bir modeldir. Bu model, yaklaşık olarak 25-60 MPa standart küp dayanımına sahip betonlarda kabul edilebilir sınırlarda kullanılabilir. Daha düşük ve daha yüksek dayanımlı betonlarda bağlı hata oranı artabilir. Bu tür betonlarda da yüksek doğruluklu sonuçlara ulaşmak için çok daha fazla sayıda deney yapılması gerekmektedir. Model-5'in geliştirilmesi için üretilen beton numuneler kalker agregasından üretilmişlerdir. Mevcut agregadan daha az ya da yüksek dayanımlı agregalar kullanılması durumunda da sonuçlar etkilenecektir. Model-5'in geliştirilmesinde kullanılmayan hatta Model geliştirildikten sonra iki yeni seri

üretilmiş, 3, 7 ve 28. Günlerde test edilmişlerdir. Bu testlere, Model-5'e ve BHO'ya ait sonuçlar Tablo 33'de verilmiştir. BHO'ların hepsi %10'un altındadır. Bu sonuçlar Model-5'in yüksek doğrulukla tahmin yapabileceğini göstermektedir.

Tablo 33. Model-5'in kontrolü ve bağıl hata oranları.

Seri Adı	Dmax	C	W/C	K/A	R	w	M	Deney	Model-5	BHO (%)
K1-3g	16	320	0,55	0,45	31	48,9	2376	33,3	32,2	-3,4
K2-3g	32	400	0,55	0,45	36	51,1	2376	42,1	38,7	-8,7
K1-7g	16	320	0,55	0,45	33	44,9	5544	38,1	37,0	-3,1
K2-7g	32	400	0,55	0,45	38	46,9	5544	44,4	42,9	-3,5
K1-28g	16	320	0,55	0,45	35	45,7	22176	41,8	41,6	-0,4
K2-28g	32	400	0,55	0,45	40	47,2	22176	50,9	47,1	-8,1

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

İnşaat teknolojisi geliştikçe, yapılar büyümekte ve hacmi büyüyen yapıların daha kısa sürede inşa edilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Yapılardaki beton imalatlarının hızlı bir şekilde yapılması, betonun dayanım kazanma hızı ile doğru orantılıdır. Beton yeterince dayanım kazandığında ilgili kalıplar sökülebilir ve inşaat devam edebilir. Beton kalıplarının erken sökülmesi önemli yapısal güvenlik sorunlarına neden olabilir. Kalıp alma sürelerinin uzaması ise ek maliyetlere neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yerinde beton dayanımının tahmin edilmesi ile ilgili kombine metotlar geliştirilmiştir. Bu kombine metotlardan, Model-1, Model-2, Model-3 ve Model-4 Kömürhan Köprüsü Kulesinin (pilonunun) yerinde beton dayanımının tespitinde kullanılarak test edilmiştir. Model-5 ise genel amaçlı kullanım için geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller ve sonuçlarına ilişkin değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Model-1’de beton test çekici ve olgunluk indeksi kombine edilmiştir. Bu iki metodun beraber kullanılmasının sebebi her ikisinin de çok hızlı ve pratik metotlar olmasıdır. İki metot kullanılarak elde edilen kombine metot, yerinde beton dayanımını yüksek doğrulukla tahmin etmiştir. Bu modelin kullanılması, kalıp alma sürelerinin optimum zaman dilimlerinde yapılmasını sağlamaktadır. Geliştirilen model, her beton türüne kolayca adapte edilerek, yerinde beton dayanımının tahmin edilmesinde kullanılabilir.
- Model-2’de beton test çekici ve windsor prob testi kullanılmıştır. Bu iki metodun beraber kullanılmasının sebebi her ikisinin de çok hızlı ve pratik metotlar olmasının yanı sıra, windsor testinin beton bünyesine nüfuz ederek sonuç vermesidir. Bu modelin kullanılması, kalıp alma sürelerinin optimum zaman dilimlerinde yapılmasını sağlamaktadır. Geliştirilen model, her beton türüne kolayca adapte edilerek, yerinde beton dayanımının tahmin edilmesinde kullanılabilir.
- Model-2’nin işletme maliyeti Model-1’den daha yüksektir. Çünkü windsor prob testinde her uygulamadan sonra prob ve güç hücresi (mermi) kullanılamaz hale gelmektedir. Bu nedenle öncelikle Model-1’in kullanılması tavsiye edilmektedir.

- İnşaat yapıldığı dönemde günlük ortalama hava sıcaklıkları önemli değişiklikler göstermiyorsa Model-1'in kullanımı tavsiye edilmektedir. Özellikle beton dökümünden sonraki 3 gün içerisinde ortalama günlük sıcaklık değerleri birbirinden çok farklıysa (beton dayanımını etkileyecek düzeyde olduğu düşünülen) Model-2'nin kullanılması daha etkin sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.
- Model-3'de ultrases geçiş hızı ve olgunluk indeksi testleri kombine edilmiştir. Bu Modelin zayıf yönü betonun yüzey nemine olan hassasiyetidir. Eğer yüzey nemi kontrol edilerek ölçümler yapılırsa daha yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek mümkün olacaktır.
- Model-4 üç farklı tahribatsız test metodunun kullanılmasıyla geliştirilmiştir. Model-4, yüksek doğruluklu bir tahmin yeteneğine sahiptir. Bu modelin en önemli avantajı, betonu yerinde etkileyen en önemli parametreleri dikkate almasıdır. Yüzey sertliği, hava sıcaklığı ve betonun iç yapısı bu model kapsamında dikkate alındığından tahmin yeteneği istenilen düzeydedir. Ayrıca özellikle erken yaş dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin edebilmesi ise başka bir önemli avantajıdır.
- Model-5 uygulamada çok fazla üretilen (dayanım sınıfları dikkate alındıklarında) beton serilerin test sonuçları kullanılarak geliştirilmiştir. Bu nedenle, beton karışımı bilinmeyen bir betonun yerinde dayanımının belirlenmesinde kullanılabilir. Model-5 kullanılarak tahmin edilen beton dayanımını kesin sonuç olarak kabul etmemek gerekir. Ancak mevcut beton hakkında yüksek doğruluklu bir sonuca ulaşılacağı öngörülmektedir. Ayrıca hem erken hem de nihai yaş dayanımlarını yüksek doğrulukla tahmin edebilmesi ise oldukça önemli avantajıdır.
- Literatürde yer alan ve en sık kullanılan beton tahribatsız test metotları bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Testler sırasında edinilen tecrübeler, kombine metotların etkinliğini ortaya koymuştur. Ancak uygulamada hâlâ yeni bir tahribatsız test metoduna ihtiyaç duyulmaktadır. Her ne kadar kombine metotlar kullanılarak, mevcut metotların dezavantajlı yönleri ortadan kaldırılmaya çalışılsa da tahribatlı metotlar sonucunda elde edilen yüksek doğruluk ve güvenilirliğe ulaşılammamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] A.M. Neville, Properties of Concrete, Pearson. (1995).
- [2] D.A. Abrams, Water-Cement Ratio as a Basis of Concrete Quality, J. Proc. 23 (1927) 452–457.
- [3] R. Jones, The non-destructive testing of concrete, Mag. Concr. Res. 1 (1949) 67–78.
- [4] and K.H. R. Meininger, F. Wagner, Concrete Core Strength—The Effect of Length to Diameter Ratio, J. Test. Eval. 5 (1977) 147–153.
- [5] J. Kolek, An appreciation of the Schmidt rebound hammer, Mag. Concr. Res. 10 (1958) 27–36.
- [6] V. Malhotra, In Situ Nondestructive Testing of Concrete, J. Proceedings, Amer Concr. Inst. (1984).
- [7] K.E. Alyamac, Y. Tas, Z.C. Ulucan, M.A. Ulas, Estimation of concrete strength combining rebound hammer and Windsor probe test methods, SMAR 2017-Fourth Conf. Smart Monit. Assess. Rehabil. Civ. Struct. (2017).
- [8] Kürşat Esat Alyamaç, Merve Açıkgenç Ulaş, Yavuzhan Taş, Ehsan Ghafari, Feasibility Analysis of NDT Methods Using to Estimate the Concrete Strength as Part of Urban Regeneration, Fırat Univ. Turkish J. Sci. Technol. 13 (2018) 9–17.
- [9] Y. Tas, K.E. Alyamac, Estimation of the in-place strength of Komurhan Bridge by the combination of rebound hammer and maturity methods, in: Int. Mediterr. Congr. Nat. Sci. Eng., 2018: pp. 19–28.
- [10] Y. Tas, K.E. Alyamac, Assessments of Concrete Strength Combining Rebound Hammer and Pin Penetration Methods, in: Int. Mediterr. Congr. Nat. Sci. Eng., Podgorica, Montenegro, 2018: pp. 159–168.
- [11] V.M. Malhotra, N.J. Carino, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, Boca Raton, FL, 2003. <https://doi.org/10.1201/9781420040050>.
- [12] P. Workman, G., & O. Moore, Nondestruct. Test. Handb. 10 Overview. 6 (2012) 213–220.
- [13] J. Helal, M. Sofi, P. Mendis, Non-destructive testing of concrete: A review of methods, Electron. J. Struct. Eng. 14 (2015) 97–105.
- [14] A.H. Swamy, N.R. and Al-Hamed, The use of pulse velocity measurements to estimate strength of air-dried cubes and hence in situ strength of concrete,

- Malhotra, V.M., Ed., ACI SP 82, Am. Concr. Institute, Farmingt. Hills, MI. (1984) 247.
- [15] J.F. Williams, A method for the estimation of compressive strength of concrete in the field, *Struct. Eng.* Vol. 14, N (1936) 321-326.
 - [16] E. Schmidt, The concrete test hammer (Der Beton-Prüfhammer), *Schweiz. Bauz.* (Zurich). 68(28) (1950) 378.
 - [17] E. Schmidt, Investigations with the new concrete test hammer for estimating the quality of concrete (Versuche mit den neuen Beton Prüfhammer zur Qualitätsbestimmung des Beton), *Schweiz. Arch. Angew. Wiss. Tech.* 17(5) (1951) 139.
 - [18] E. Schmidt, The concrete sclerometer, *Proc. Int. Symp. Non-Destructive Test. Mater. Struct.* Vol. 2 (1954) 310.
 - [19] A. Brencich, G. Cassini, D. Pera, G. Riotto, Calibration and Reliability of the Rebound (Schmidt) Hammer Test, *Civ. Eng. Archit.* 1 (2013) 66–78. <https://doi.org/10.13189/cea.2013.010303>.
 - [20] V.M. Carrette, G.G. and Malhotra, In-situ tests: variability and strength prediction of concrete at early ages, Malhotra, V.M., Am. Concr. Institute, Spec. Publ. SP-82. (n.d.) 111.
 - [21] A. Voellmy, Examination of Concrete by Measurements of Superficial Hardness, *Proc. Int. Symp. on Nondestructive Testing of Materials and Structures*, *Proc. Int. Symp. Nondestruct. Test. Mater. Struct.* (1954) 323.
 - [22] R.C. Klotz, Field investigation of concrete quality using the Windsor probe test system, *Highw. Res. Board.* (1972) 50–54.
 - [23] V. Keeton, J.R. and Hernandez, Calibration of Windsor Probe Test System for Evaluation of Concrete in Naval Structures, *Tech. Note N-1233*, *Nav. Civ. Eng. Lab.* (1972).
 - [24] J.R. Clifton, Non-Destructive Tests to Determine Concrete Strength—A Status Report, *NBSIR 75- 729*, *Natl. Bur. Stand.* (n.d.).
 - [25] D.G.G. Bowers, Assessment of Various Methods of Test for Concrete Strength, *Connect. Dep. Transp. Highw. Adm.* (1978).
 - [26] M.J. Bartos, Testing concrete in place, *Civ. Eng. Am. Soc. Civ. Engrs.* (1979) 66.
 - [27] V.M. Malhotra, Testing of hardened concrete: nondestructive methods, *Monogr. No. 9*, *Am. Concr. Inst.* (1976) 188.

- [28] R.D. Gaynor, In-place Strength of Concrete - A Comparison of Two Test Systems, Presented at 39th Annual Convention of The National Ready Mixed Concrete Association, (1969).
- [29] H.T. Arni, Impact and penetration tests of portland cement concrete, Highw. Res. Board. (1972) 55–67.
- [30] V.M. Malhotra, Preliminary Evaluation of Windsor Probe Equipment for Estimating the Compressive Strength of Concrete, Mines Branch Investig. Rep. IR 71-1, Dep. Energy, Mines Resour. (1970).
- [31] V.M. Malhotra, Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength, Inf. Circ. IC 277, Dept. Energy Mines Resour. (1971) 43.
- [32] V.M. Malhotra, Evaluation of the Windsor Probe Test for Estimating Compressive Strength of Concrete, RILEM Mater. Struct. Paris. (1974) 7:37:3-15.
- [33] A.P. Keiller, A Preliminary Investigation of Test Methods for the Assessment of Strength of In-Situ Concrete, Tech. Rep. No. 551, 1982.
- [34] A.P. Keiller, Assessing the strength of in-situ concrete, Concr. Int. ACI., 7 (1985) 15–21.
- [35] A.H.M.S. Swamy, R.N. and Al-Hamed, Evaluation of the Windsor Probe Test to Assess In-Situ Concrete Strength, Proc. Inst. Civ. Eng. 2 (1984) 167.
- [36] J.H. Bungey, The Testing of Concrete in Structures, Chapman Hall. (1982).
- [37] S. Freedman, Field testing of concrete strength, Mod. Concr. 14 (1969) 31.
- [38] A. 207-79, Practices for Evaluation of Concrete in Existing Massive Structures for Service Conditions, ACI Man. Concr. Pract. (1983).
- [39] K.H. Lee, S.L., Tam, C.T., Paramasivam, P., Ong, K.C.G., Swaddiwudhipong, S., and Tan, Structural Assessment in In-Situ Testing and Interpretation of Concrete Strength, Dep. Civ. Eng. Natl. Univ. Singapore. Department (1988).
- [40] M. Carino, N.J. and Sansalone, Impact-echo: a new method for inspecting construction materials, Proc. Conf. Nondestruct. Test. Eval. Manuf. Constr. Dos Reis, H.L.M., Ed., Hemisph. (1990) 209.
- [41] N.J. Carino, Laboratory study of flaw detection in concrete by the pulse-echo method, in In Situ/ Nondestructive Testing of Concrete, Malhotra, V.M., Ed., ACI SP-82, Am. Concr. Institute, Farmingt. Hills, MI. (1984) 557.
- [42] K.P. Malhotra, V.M. and Painter, Eval. Wind. Probe Test Estim. Compressive

- Strength Concr. 7 (1971) 3–15.
- [43] N.N. Carino, N.J., Sansalone, M., and Hsu, A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, A Point Source-point Receiv. Tech. Flaw Detect. Concr. J. Am. Conc. Inst. 83 (1986) 199–208.
 - [44] R. Stain, Integrity testing, (1982) 53–59.
 - [45] A.C. 228, Inplace Methods Determ. Strength Concr. 85 (5) (1988) 446.
 - [46] T.C. Powers, Measuring Young's modulus of elasticity by means of sonic vibrations, Proc. ASTM, 38. (Part II) (1938) 460.
 - [47] L. Obert, Sonic method of determining the modulus of elasticity of building materials under pressure, Proc. ASTM. (1939) 987.
 - [48] F.B. Hornibrook, Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete, ASTM Bull. No. 101. (1939) 5.
 - [49] W.T. Thomson, Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method, Proc. ASTM. (1940) 1113.
 - [50] W.J. Leslie, J.R. and Cheesman, An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures, ACI J. Proc. (1949) 17.
 - [51] R. Jones, The Application of Ultrasonic to the Testing of Concrete, Res. London. (1948) 383.
 - [52] E.A. Whitehurst, Evaluation of concrete properties from sonic tests, ACI Monogr. No. 2, Am. Concr. Institute/Iowa State Univ. Press. (1966).
 - [53] A.W. Van der Winder, N.G.B. and Brant, Ultrasonic Testing for Fresh Mixes, Concr. Cem. Concr. Assoc. (1977) 25.
 - [54] R. Jones, Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge Univ. Press. (1962).
 - [55] A.T.D.C. 597-02, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Annu. B. ASTM Stand. West Conshohocken. Vol. 04.02 (2003).
 - [56] J.H. Qixian, L. and Bungey, Using compression wave ultrasonic transducers to measure the velocity of surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete, Constr. Build. Mater. 10 (1996) 237–242.
 - [57] A. Benedetti, On the Ultrasonic Pulse Propagation into Fire Damaged Concrete, Struct. J. 95 (1998) 259–271.
 - [58] R.E. and W. Bullock, Effect of certain variables on pulse velocities through concrete, 206 (1959) 37.

- [59] H. Sturup, V.R. Vecchio, R.J., and Caratin, Pulse Velocity as a Measure of Concrete Compressive Strength, ACI SP 82-11, Am. Concr. Inst. (1984) 201.
- [60] R.K. Anderson, D.A. and Seals, Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 day strength, ACI J. 78 (1981) 116.
- [61] R. Jones, Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique, RILEM Int. Symp. Nondestruct. Test. Mater. Struct. Paris, Vol. 1, Pap. No. A-17. (1954) 137.
- [62] J.S. Popovics, S., Rose, J.L., and Popovics, The behaviour of ultrasonic pulses in concrete, Cem. Concr. Res. 20 (1990) 259–270.
- [63] M.F. Kaplan, Ultrasonic pulse velocity, dynamic modulus of elasticity, Poisson's ratio and the strength of concrete made with thirteen different coarse aggregates, RILEM Bull. (Paris). New Series (1959) 85.
- [64] S. Hannachi, M.. Guetteche, Review of the ultrasonic pulse velocity Evaluating concrete compressive strength on site, Sci. Coop. Int. Work. Eng. Work. Eng. Branches. (2014) 103–112.
- [65] R. and F. Jones, Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method Mater. Struct. Res. Testing, Mater. Struct. Res. Test. 2(19) (1969) 275.
- [66] M.F. Kaplan, Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns, ACI J. (1958) 675.
- [67] R.R.N. 1, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, (1972).
- [68] J.S.. Popovics, S. and Popovics, Effect of stresses on the ultrasonic pulse velocity in concrete, RILEM Mater. Struct. 24 (1991) 15.
- [69] T.F. Wu, T.T and Lin, The stress effect on the ultrasonic velocity variations of concrete under repeated loading, ACI Mater. J. 95(5) (1998) 519.
- [70] B.S. Institution, BS 1881, Part 203, Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, 203 (1986).
- [71] H.W. Chung, Effect of embedded steel bar upon ultrasonic testing of concrete, Mag. Concr. Res. 30(102) (1978) 19.
- [72] K.S. Chung, H.W. and Law, Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique, Concr. Int. (1983) 42.
- [73] J.H. Bungey, The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing, Am. Concr. Inst. 82 (1984) 229–246.
- [74] R.E. Philleo, Comparison of results of three methods for determining Young's modulus of elasticity of concrete, ACI J. Proc. 51 (1955) 461–470.

- [75] M.P. Rebic, The distribution of critical and rupture loads and determination of the factor of crackability, *ACI J.* 80 (1983) 17.
- [76] A.C. 228, In-Place Methods to Estim. Concr. Strength. *ACI 228.1R* (1995).
- [77] W.E. Parker, Pulse velocity testing of concrete, *Proc. ASTM.* 53 (1953) 1033.
- [78] D. and O. McHenry, C.C. Pulse velocity measurements on concrete dams, 9th *Int. C* (1967) 73.
- [79] D.A. Olson, L.D. and Sack, Nondestructive evaluation of concrete dams and other structures, *Proc. SPIE (The Int. Soc. Opt. Eng.* 2457 (1995) 113.
- [80] M. Rhazi, J. Kharrat, Y., Ballivy, G., and Rivest, Application of acoustical imaging to the evaluation of concrete in operating structures, *ACI SP 168.* (1997) 221.
- [81] J. Chefdeville, Application of the Method toward Estimating the Quality of Concrete, *Spec. Issue-Vibrating Test. Concr.* 2nd part (1953) 61.
- [82] A.M. Neville, A study of deterioration of structural concrete made with high alumina concrete, *Proc. Inst. Civ. Eng.* (1963) 287.
- [83] J.H. Bungey, Ultrasonic testing to identify alkali-silica reaction in concrete, *Br. J. NDT.* (1991) 227.
- [84] J.D. Selleck, S.F., Landis, E.N., Peterson, M.L., Shah, S.P., and Achenbach, Ultrasonic investigation of concrete with distributed damage, *ACI Mater. J.* 95 (1) (1998) 27.
- [85] A.G.A. Saul, Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, *Mag. Concr. Res.* 2 (1951) 127.
- [86] S.G. Bergstrom, Curing temperature, age and strength of concrete, *Mag. Concr. Res.* 5(14) (1953) 61.
- [87] J.M. Plowman, Maturity and the strength of concrete, *Mag. Concr. Res.* (1956) 13.
- [88] J.D. McIntosh, The effects of low-temperature curing on the compressive strength of concrete, *Proc. RILEM Symp. Winter Concreting, Sess. BII, Copenhagen, Danish Inst. Build. Res. Copenhagen.* (1956).
- [89] J.H. Alexander, K.M. and Taplin, Concrete strength, cement hydration and the maturity rule, *Aust. J. Appl. Sci.* 13 (1962) 277.
- [90] Cold weather concreting, in: *ACI 306R-88 (Reapproved 1997), Rep. by Comm.* 306, 1997.

- [91] E. Kukko, H. and Koskinen, I., RILEM Recommendations for Concreting in Cold Weather, 1988.
- [92] E.J. Freiesleben Hansen, P. and Pedersen, Vinterstøbning af beton, Anvisn. 125, Statens Byggeforskningsinstitut. (1982).
- [93] R. by A.C. 228, In-Place Methods to Estimate Concrete Strength, 1995.
- [94] J.D.. McIntosh, Electrical curing of concrete, Mag. Concr. Res. 1(1) (1949) 21.
- [95] R.W. Nurse, Steam curing of concrete, Mag. Concr. Res. 1 (1949) 79.
- [96] E. Rastrup, Heat of hydration in concrete, Mag. Concr. Res. 6 (1954) 79–92.
- [97] G. Wastlund, Hardening of concrete as influenced by temperature, Gen. Rep. Sess. BII, Proc. RILEM Symp. Winter Concreting, Copenhagen, Danish Inst. Build. Res. (1956).
- [98] P. Klieger, Effects of mixing and curing temperatures on concrete strength, J. Am. Concr. Inst. 54(12) (1958) 1063.
- [99] R.H. Verbeck, G.J. and Helmuth, Structure and physical properties of cement paste, Proc. Fifth Int. Symp. Chem. Cem. (1968) 1–32.
- [100] J.-K. Kim, Y.-H. Moon, S.-H. Eo, Compressive Strength Development of Concrete With, Cem. Concr. Res. 28 (1998) 1761–1773.
- [101] Türk Standardları Enstitüsü, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, 2003.
- [102] ASTM, ASTM C805 / C805M - 13a, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, n.d.
- [103] ASTM, ASTM C597 - 09, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, n.d.
- [104] ASTM, ASTM C803 / C803M - 03, Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete, n.d.
- [105] ASTM, ASTM C1074 - 98, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, n.d.
- [106] ASTM, ASTM C918-02, Standard Test Method for Measuring Early-Age Compressive Strength and Projecting Later-Age Strength, n.d.
- [107] B. Demirel, E. Gultekin, K.E. Alyamac, Performance of Structural Lightweight Concrete containing Metakaolin after Elevated Temperature, KSCE J. Civ. Eng. (2019) 1–8.
- [108] W.F. Smith, Experimental design for formulation, SIAM, 2005.

- [109] A. Dean, D. Voss, D. Draguljić, Design and analysis of experiments, Springer, 1999.
- [110] Design-expert Software, (2016). <https://www.statease.com/>.

