

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPILARDA SONREB YÖNTEMİNİ KULLANARAK BETON BASINÇ
DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MEVCUT YÖNTEMLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet CAN

ARALIK – 2024

T.C.
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPILARDA SONREB YÖNTEMİNİ KULLANARAK BETON BASINÇ
DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MEVCUT YÖNTEMLERİN
KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet CAN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ

ARALIK – 2024

“YAPILARDA SONREB YÖNTEMİNİ KULLANARAK BETON BASINÇ DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MEVCUT YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması **Ahmet CAN** tarafından hazırlanmış olup aşağıdaki jüri tarafından **OY BİRLİĞİ** ile Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ
Kırklareli Üniversitesi

.....

Jüri Üyeleri:

Doç. Dr. Burak ÖZŞAHİN
Kırklareli Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Ziya MÜDERRİSOĞLU
İstanbul Beykent Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 03/01/2025

.....
Doç. Dr. H. HALE KARAYER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza
Ahmet CAN
03/01/2025

ÖZET

YAPILARDA SONREB YÖNTEMİNİ KULLANARAK BETON BASINÇ DAYANIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MEVCUT YÖNTEMLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet CAN

Yüksek Lisans

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ

Ocak 2025, 99 sayfa

Hasarsız Muayene Yöntemleri, mühendislikte yapı ve malzeme sistemlerinin incelenmesi için yaygın olarak kullanılan bir dizi tekniktir. Bu yöntemler, yapılarda veya yapı elemanlarında yapısal veya fonksiyonel hasara neden olmadan çeşitli malzeme özelliklerini ve gözle görülemeyen kusurları tespit etmek için kullanılır.

Hasarsız muayene yöntemleri, yapısal durum tespitini güvenilir hale getirirken süre ve maliyeti azaltarak önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntemler genellikle doğrudan ölçümler yerine, kullanılan yöntemin temel prensiplerine dayanarak dolaylı olarak istenilen özellikleri tahmin ederler. Betonun basınç dayanımını bulabilmek üzere Türkiye'de en çok kullanılmakta olan hasarsız muayene deney yöntemi, beton test çekici ve ultrasonik test yöntemleridir.

Bazen bir beton eleman üzerinde hem beton test çekici yöntemiyle hem de ultrasonik yöntemle ölçümler yapılmakta ve bulunan sonuçlar birlikte değerlendirilmektedir. Birleştirilmiş yöntem olarak adlandırılan bu yöntem, en az iki farklı tahribatsız test yönteminin bir araya getirilerek kullanılmasıyla belirli bir özelliğin tahmin edilmesini sağlar.

Beton dayanımının belirlenmesi için kullanılan birleştirilmiş yöntemlerden biri, ultrases dalga hızı ile Schmidt geri tepme değerlerinin birlikte kullanılması ile olan SonReb yöntemidir. Bu yöntem, beton dayanımının tahmin edilmesini mümkün kılar. Bu tez kapsamında İstanbul İlinde İlkon Mühendislik Firması tarafından farklı yapılarda gerçekleştirilen beton test çekici ve ultrases hızı testi değerleri ele alınarak bu veriler literatürde sunulan tüm SonReb formüllerinde kullanılmıştır. Sonuç olarak SonReb formülizasyonu için yeni modeller geliştirilmiştir.

Bu çalışmada farklı yapılarda farklı taşıyıcı elemanlarda İlkon Mühendislik Firması tarafından beton test çekici testi ve ultrases hızı testinin gerçekleştirilmesiyle elde edilen sonuçlar kapsamlı olarak ele alınmıştır. Sonuç olarak SonReb formülüzasyonu için yeni modeller geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hasarsız Muayene Yöntemleri, Yapısal Durum Tespiti, Basınç Dayanımı, Beton Test Çekici Testi, Ultrases Hızı Testi



ABSTRACT

COMPARISON OF EXISTING METHODS FOR ASSESSING CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH IN STRUCTURES USING SONREB METHOD

Ahmet CAN

MSc Thesis

Kırklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kadir KILINÇ

January 2025, 99 pages

Non-destructive testing methods are a set of techniques widely used in engineering for the examination of structures and material systems. These methods are used to detect various material properties and non-visible defects in structures or structural elements without causing structural or functional damage.

Non-destructive testing methods play an important role in making structural condition assessment reliable while reducing time and cost. Instead of direct measurements, these methods usually indirectly predict the desired properties based on the basic principles of the method used. The most widely used non-destructive testing methods in Turkey to determine the compressive strength of concrete are the concrete test hammer and ultrasonic testing methods.

Sometimes measurements are made on a concrete member using both the concrete test hammer method and the ultrasonic method and the results are evaluated together. A so-called combined method allows the prediction of a specific property by combining at least two different non-destructive testing methods.

One of the combined methods for the determination of concrete strength is the combination of ultrasound wave velocity and Schmidt rebound values. This method makes it possible to estimate the concrete strength. Within the scope of this thesis, the values of concrete test hammer and ultrasound velocity tests performed by Ilkon Engineering Company in different structures in Istanbul Province were taken and these data were used in all SonReb formulas presented in the literature. As a result, new models for SonReb formulation have been developed.

In this study, the results obtained by Ilkon Engineering Company by performing concrete test hammer test and ultrasonic pulse velocity test on different structural elements in different structures are discussed comprehensively. As a result, new models for the SonReb formulation have been developed.

Keywords: Non-destructive testing methods, Structural condition assessment, Compressive strength, Concrete test hammer test, Ultrasonic pulse velocity test



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim sırasında daha iyiye ulaşmam için benden desteğini esirgemeyerek bilimsel ufkumun genişlemesi için çaba sarf eden tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir KILINÇ'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimde her aşamada desteği ve güler yüzlerini esirgemeyen Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezi analiz çalışmalarında kullanılan test verilerinin temininde her türlü desteği sağlayan İlkon Mühendislik Firması sahibi Sayın Kamil Onur Önal'a çok teşekkür ederim.

Maddi, manevi destekleri için anneme, babama teşekkür ederim.

Son olarak; hayatımın her evresinde bana destek olan, varlığı ile hayatıma anlam katan eşim Yeliz CAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet CAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	İV
ABSTRACT.....	VI
TEŞEKKÜR.....	Viii
İÇİNDEKİLER.....	İX
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	X
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	Xi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	Xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	3
1.2. Çalışmanın Araştırma Metodolojisi.....	4
1.3. Çalışmanın Araştırma Soruları.....	4
1.4. Çalışmanın Özgün Değeri.....	5
2. TAHRİBATSIZ TEST YÖNTEMLERİ.....	7
2.1. Tahribatsız test yöntemlerinin önemi.....	7
2.2. Tahribatsız test yöntemlerinin başlıca kullanım alanları ve faydaları.....	8
2.3. Beton test çekici testi.....	10
2.4. Ultrases hızı testi.....	13
2.5. Kombine SonReb yöntemi.....	18
3. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	27
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	57
6. GENEL SONUÇLAR.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1. Betonun UPV sonuçlarına göre karşılaştırılması (Ardahanlı ve Oltulu, 2020).....	17
Çizelge 4.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan SonReb formülüzasyonları.....	55
Çizelge 5.1. Mesken 1-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	68
Çizelge 5.2. Mesken 2-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	69
Çizelge 5.3. Mesken 3-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	70
Çizelge 5.4. Mesken 4-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	71
Çizelge 5.5. Mesken 5-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	72
Çizelge 5.6. Mesken 6-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	73
Çizelge 5.7. Mesken 7-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	74
Çizelge 5.8. Mesken 8-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	75
Çizelge 5.9. Mesken 9-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	76
Çizelge 5.10. Mesken 10-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları.....	77

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 5.1. Mesken 1-Beton test çekici test sonuçları.....	57
Şekil 5.2. Mesken 1-Ultrases hızı test sonuçları.....	58
Şekil 5.3. Mesken 2-Beton test çekici test sonuçları.....	58
Şekil 5.4. Mesken 2-Ultrases hızı test sonuçları.....	59
Şekil 5.5. Mesken 3-Beton test çekici test sonuçları.....	59
Şekil 5.6. Mesken 3-Ultrases hızı test sonuçları.....	60
Şekil 5.7. Mesken 4-Beton test çekici test sonuçları.....	60
Şekil 5.8. Mesken 4-Ultrases hızı test sonuçları.....	61
Şekil 5.9. Mesken 5-Beton test çekici test sonuçları.....	61
Şekil 5.10. Mesken 5-Ultrases hızı test sonuçları.....	62
Şekil 5.11. Mesken 6-Beton test çekici test sonuçları.....	62
Şekil 5.12. Mesken 6-Ultrases hızı test sonuçları.....	63
Şekil 5.13. Mesken 7-Beton test çekici test sonuçları.....	63
Şekil 5.14. Mesken 7-Ultrases hızı test sonuçları.....	64
Şekil 5.15. Mesken 8-Beton test çekici test sonuçları.....	64
Şekil 5.16. Mesken 8-Ultrases hızı test sonuçları.....	65
Şekil 5.17. Mesken 9-Beton test çekici test sonuçları.....	65
Şekil 5.18. Mesken 9-Ultrases hızı test sonuçları.....	66
Şekil 5.19. Mesken 10-Beton test çekici test sonuçları.....	66
Şekil 5.20. Mesken 10-Ultrases hızı test sonuçları.....	67
Şekil 5.21. Mesken 1- SonReb analiz test sonuçları	68
Şekil 5.22. Mesken 2- SonReb analiz test sonuçları	69
Şekil 5.23. Mesken 3- SonReb analiz test sonuçları	70
Şekil 5.24. Mesken 4- SonReb analiz test sonuçları	71
Şekil 5.25. Mesken 5- SonReb analiz test sonuçları	72
Şekil 5.26. Mesken 6- SonReb analiz test sonuçları	73
Şekil 5.27. Mesken 7- SonReb analiz test sonuçları	74
Şekil 5.28. Mesken 8- SonReb analiz test sonuçları	75
Şekil 5.29. Mesken 9- SonReb analiz test sonuçları	76
Şekil 5.30. Mesken 10- SonReb analiz test sonuçları	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

<i>Hz</i>	hertz
<i>kHz</i>	kilohertz
<i>kg</i>	Kilogram
<i>kN/m²</i>	Kilo Newton/metrekare
<i>Mpa</i>	Megapaskal
<i>m/sn</i>	metre/saniye
<i>t</i>	Ton
<i>w/c</i>	su/çimento
<i>μs</i>	mikro saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

<i>DT</i>	Tahribatlı test yöntemi
<i>F_c</i>	Beton dayanımı
<i>HCVCM</i>	Yüksek İlişkili Değişkenler Oluşturma Makinesi
<i>ML</i>	Makine Öğrenimi
<i>NDT</i>	Tahribatsız test yöntemi
<i>R</i>	Rebound sayısı
<i>RN</i>	Geri tepme sayısı
<i>RSM</i>	Tepki Yüzeyi Metodolojisi
<i>SCC</i>	Kendiliğinden yerleşen betonun
<i>SR</i>	Yüzey elektrik özdirenci
<i>UHPC</i>	Fiziksel özellikleri en üst seviyeye çıkarılan beton
<i>UPV</i>	Ultrasonik dalga hızı
<i>V</i>	Ultrasonik dalga hızı
<i>YSA</i>	Yapay sinir ağı



1. GİRİŞ

Betonarme yapıların doğal afetlere karşı güvenilirliği, malzeme kalitesi, işçilik, betonarme yapı elemanlarının tasarımı ve üretim teknikleri gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Konuyla ilgili önemli parametrelerden biri de beton kalitesidir. Betonarme yapıların beton kalitesinin az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde gelişmiş ülkelere kıyasla çok düşük olduğu gözlemlenmektedir. Yapının türü ne olursa olsun (binalar, köprüler, barajlar, vb.), betonun basınç dayanımının doğru ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi, kalite değerlendirmesi için inşaat sırasında ve ayrıca yapısal değerlendirme için inşaat sonrasında mühendisler için önemli bir gerekliliktir. Beton basınç dayanımını değerlendirmek için birincil ve en güvenilir yöntem, yapıdan çıkarılan silindir numuneler veya karotlar üzerinde testler yapmaktır. Bununla birlikte, bu yaklaşım genellikle çeşitli dezavantajlara sahiptir. Bunlardan en önemlisi, bazı durumlarda nispeten büyük numune boyutlarına ihtiyaç duyulması ve elde edilen numunelerin temsil edilebilirliğine ilişkin belirsizliktir. Mevcut yapı elemanlarında, yapıya zarar verdikleri için karotların çıkarılması her zaman mümkün değildir. Ayrıca, yapının sağlam kısımlarından alınan karotlar kusur içeren bölgeleri temsil etmemekte, kusurlu betondan karot alınması ise genellikle kabul edilmemektedir. Yeni betonarme (RC) yapılarda, yapı sahipleri genellikle yepyeni bir yapıda, özellikle de yönetmelikler ve yönergeler tarafından belirlenen minimum numune sayılarında karot numune alma konusunda isteksizdir. Bazı kılavuzlar, ihtiyaç duyulan karot testlerinin sayısını azaltmaya ve karotların boyutunu küçültmeye çalışmıştır. Ancak bu temel zorluklar devam etmektedir. Bu doğrultuda, iki basit, hızlı ve ekonomik tahribatsız test (NDT) yöntemi, yani ultrasonik dalga hızı (UPV) ve geri tepme sayısı (RN) ölçümleri son yıllarda ilgi görmeye başlamıştır. NDT yöntemleri, gerekli karot sayısını önemli ölçüde azaltırken dayanım tahminlerinin elde edilmesini sağlayan nispeten düşük maliyetli ve tekrarlanabilir bir değerlendirme aracı sağlar. Bununla birlikte, NDT değerlendirmesinin sonuçlarını kullanmak için sonuçları NDT ölçümleriyle ilişkilendirmek üzere her proje için karot numuneleri üzerinde basınç testleri yapmak hala gereklidir.

Bilim dünyasında, herkesçe bilinmektedir ki binaların yapısal güvenliği açısından malzemenin sağlamlığı önemli bir yer tutmaktadır. Malzemelerin mekanik ve fiziksel

özelliklerinin değerlendirilmesi için pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin çoğu malzemeye hasar vermesinin yanında hem çok zaman almakta hem de çok maliyetli olmaktadır. Bu yöntemlerden farklı olarak yapıyı tahrip etmeden, fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespiti için test imkânı veren ve çok tercih edilen, Non-Destructing Testing (NDT) olarak bilinen yöntemler mevcuttur. Tahribatsız muayene (NDT), tüm sistemin ve/veya parçanın hizmet verebilirliğini tahrip etmeden veya bozmadan test etme, denetleme veya değerlendirme alanı olarak açıklanmaktadır. NDT'nin amacı, bileşenlerin, montajların veya malzemelerin kalitesini ve bütünlüğünü, hizmet verebilirlik ve/veya önceden belirlenmiş işlevlerini yerine getirme yetenekleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadan göstermektir. Yapısal hasarı tespit etme ve önleme ihtiyacına yönelik olarak, NDT yöntemleri amaçlanan gereksinime bir cevap olarak üretilmiştir. Mühendislik projelerinin çoğunda ve özellikle binaların durum değerlendirmesinde ekonomi önemli kurallar oynamaktadır, NDT yöntemleri bu konuya cevap verebilir ve ayrıca değerlendirmenin uygulanmasında daha fazla güvenlik sağlayabilir. Yapısal hasar veya bozulma ile ilgili sorunları ortadan kaldırmak için, bir yapının inşası ve hizmet ömrü boyunca betonu değerlendirme yeteneği sağlamak için önleyici bir tedavi olarak bazı saha içi test teknikleri geliştirilmiştir. Tahribatsız test yöntemlerinin uygulamasında tek bir yöntemin kullanımının doğru olmayacağı ulusal ve uluslararası literatürde açık olarak belirtilmektedir. Tahribatsız test yöntemlerinin kombinasyonunun daha doğru sonuçlar sağladığı belirtilmektedir. Bu nedenle, beton dayanımının tahribatsız muayene yöntemleriyle belirlenmesi, yapıların güvenliği ve sismik performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Bu yöntemler, yapıların içerisindeki betonun dayanımını belirlemek için çeşitli teknolojiler kullanmaktadır ve bu sayede yapıların güvenliğini artırmak için gerekli önlemlerin alınmasına yardımcı olmaktadır. Örneğin, ultrasonik muayene yöntemi, betonun içerisindeki boşluklar, çatlaklar veya diğer kusurların tespitinde kullanılır. Bu yöntem, betonun içerisine ultrasonik dalgalar göndererek betonun ses hızını ölçer ve bu sayede betonun homojenliği ve dayanımı hakkında bilgi sağlar. Tahribatsız muayene yöntemleri kullanım açısından tahribatlı test yöntemlerine göre daha hızlı ve ekonomiktir. Ayrıca, bu yöntemler yapıların işletme süreçlerini kesintiye uğratmazlar ve daha az malzeme ve işgücü kullanımıyla gerçekleştirilir.

Bu nedenle, beton dayanımının tahribatsız muayene yöntemleriyle belirlenmesi, yapıların güvenliği ve sismik performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Beton test çekici yöntemi yalnızca yüzeyin sertliği ile ilgilidir, ultrasonik yöntem ise betonun içinde yer alan boşluklar ve beton yoğunluğuyla ilgilidir. Bu iki yöntem birlikte uygulandığında biri diğerinin bazı hatalarını azaltıcı veya eksiklerini tamamlayıcı olduğundan sadece birinin uygulanmasına göre daha az tahmin hatası olacağı söylenebilmektedir. Bu yöntemde hem beton test çekici yöntemi hem de ultrasonik yöntem birlikte kullanıldığından dolayı birleşik yöntem ya da SonReb yöntem adını almaktadır.

Bu tez kapsamında İstanbul İl'inde deprem analizi testleri hususunda uzman bir firma olan İlkon Mühendislik Firması tarafından farklı yapılarda taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen beton test çekici ve ultrases hızı testi değerleri ele alınmıştır. Bu veriler uluslararası literatürde farklı araştırmacılar tarafından sunulan SonReb formülizasyonlarında yerine koyularak elde edilen değerler üzerinde bir değerlendirme gerçekleştirilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Beton, günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Özellikle ülkemizde yapı sektöründe betonun kullanımı yaygın hale gelmiştir. Beton homojen bir yapıya sahip değildir. Dolayısıyla betonun basınç dayanımının ve kalitesinin yerinde kontrolü zor bir hale gelmektedir. Sonuç olarak betonun mekanik özelliklerinin kontrol altında olabilmesi için tahribatsız yöntemlerin kullanımı ön plana çıkmaktadır. Tahribatsız test yöntemleri yeni yapılarda kalite kontrolü, yeni yapılarda malzeme kalitesi ve uygulama ilgili problemlerin tespiti ve çözümü, mevcut yapıların yapısal güvenlik değerlendirmesi ve rehabilitasyon amaçlı durum tespitinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca mevcut yapılarda rehabilitasyon, yenileme, tamir ve güçlendirme uygulamalarının kalite kontrolü, yapıların zararlı çevresel etkilere dayanıklılık değerlendirmesi ve kalan kullanım ömrünün tahminine de olanak sağlamaktadır.

"SonReb" yöntemi, bir yapıdaki beton dayanımını tahmin etmek için kullanılan bir bileşik yıkıntısız beton denetimi yöntemidir. Bu yöntem, Schmidt çekici okumaları ve ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçlarını kullanarak betonun dayanımını tahmin etmektedir. Yapılan ölçümler, laboratuvarında oluşturulan özel "eş-dayanım" eğrileri ile beton basınç dayanımına dönüştürülmektedir. Ayrıca, binanın uygun yerlerinden karotiyerle beton örnekleri alınarak beton mukavemeti yıkıntılı olarak da elde edilmekte ve her iki

yöntemle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. SonReb metodu, yerinde beton dayanımını hızlı bir şekilde tahmin etmenin yanı sıra yapıya zarar vermeden gerçekleştirilmesi avantajına sahiptir. Bileşik yıkıntısız yöntemin en önemli avantajı ise, tekil olarak kullanılan yöntemlerin hata oranlarını en aza indirerek daha güvenilir sonuçlar elde etmeyi sağlamasıdır. Bu yöntem, betonun dayanımını belirlemek için etkili bir çözüm sunar ve yapıların güvenliğini sağlamak için önemli bir araçtır.

Bu tez kapsamında yapı deprem testleri alanında uzman bir firma olan İlkon Mühendislik firmasının farklı yapılardaki taşıyıcı elemanlardan elde ettiği beton test çekici test sonuçları ile ultrases hızı test sonuçları ele alınmıştır. Bu veriler uluslararası literatürdeki SonReb denklemlerinde yerine koyularak elde edilen tüm sonuçlar kapsamlı bir biçimde irdelenmiştir. Her bir bina için uluslararası literatürdeki SonReb formülüzasyonlarından ortaya çıkan tüm sonuçlar diyagram olarak tez kapsamında sunulmuştur.

1.2. Çalışmanın Araştırma Metodolojisi

Bu tez çalışması araştırma türü ve modeli olarak bir analiz çalışması olmuştur. Analiz çalışmaları sonucunda İlkon Mühendislik Firmasının farklı yapılarda taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici ve ultrases hızı test verilerinin uluslararası literatürde yer alan SonReb formülüzasyonlarındaki karşılığı ortaya konmuştur. Veri toplama araçları olarak İlkon Mühendislik Firmasının farklı yapılarda taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici ve ultrases hızı test verileri kullanılmıştır. Verilerin analizi sürecinde Excel programından yararlanılmıştır. Verilerin analizi kısmında Excel programında her farklı yapı için uluslararası literatürde yer alan SonReb formülüzasyonlarından elde edilen sonuçları içeren grafikler oluşturulmuştur. Ulusal ve uluslararası literatürde yapılarda farklı taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen beton test çekici testi ve ultrases hızı testi çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalarda farklı araştırmacılar tarafından farklı SonReb formülüzasyonları ortaya konmuştur.

1.3. Çalışmanın Araştırma Soruları

Bu tez çalışmasının araştırma soruları aşağıda sunulmuştur;

- Neden SonReb yöntemi üretilmiştir ve kullanılmaktadır?
- Yapılarda kolon ve perdelerde beton test çekici test sonuçları ile ultrases hızı test sonuçları arasında önemli farklılıklar var mıdır?

- Yapılarda mevcut verilerin uluslararası literatürde yer alan SonReb formülüzasyonlarında uygulanmasıyla ortaya çıkan sonuçların birbirleri arasında önemli farklılıklar var mıdır?

1.4. Çalışmanın Özgün Değeri

Çalışma ile yapılarda taşıyıcı elemanlarda uygulaması gerçekleştirilen beton test çekici ve ultrases hızı testi sonuçlarının özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda bir çalışmanın ulusal ve uluslararası literatürde çok fazla yer almadığı gözlenmiştir ve hipotezler bu konuda yoğunlaştırılmıştır. Böylesi bir çalışma ile yapılardaki SonReb formülüzasyonları ve beton kalitesi hakkında yeni modeller ortaya konmuştur. Bu çalışma sayesinde farklı yapılarda taşıyıcı elemanlardaki tahribatsız test sonuçlarındaki değişkenlik de açıkça ortaya konmuştur. Bu çalışma sayesinde İlkon Mühendislik Firmasının farklı yapılarda taşıyıcı elemanlarda beton kalitesinin SonReb formülüzasyonları bağlamında değerlendirilebilmesi bakımından da fikir sahibi olunmuştur. Bu çalışma sayesinde İlkon Mühendislik Firmasının farklı yapılarda taşıyıcı elemanlarda beton test çekici testi ve ultrases hızı testi sonuçlarındaki değişkenliğin taşıyıcı eleman bağlamındaki farklılığı da açıkça ortaya konmuştur.

2. TAHRİBATSIZ TEST YÖNTEMLERİ

2.1. Tahribatsız Test Yöntemlerinin Önemi

Beton numunelerin kırılması, delinmesi gibi olumsuz durumlarla karşılanan deney yöntemleri yerine betonların kırılıp, delinmeden tespit yapılacak deney yöntemleri ortaya çıkmıştır. Geliştirilmiş olan bu deney yöntemlerinde basınç dayanımı bulmak için betonun kırılıp, delinmesi gerekmediği için bu yöntem ‘tahribatsız test yöntemleri’ olarak adlandırılmaktadır. Tahribatsız test yöntemleri, imalatın hızlandırılması için kalıp alma, kür işlemine son verme, dikmelerin sökülmesi gibi işlemler olabildiğince erken ve güvenlik içinde yapılmasında pratik olarak çözüme ulaştırmak için kolay test yöntemlerindendir. Yerinde tahribatsız deney yöntemleri sayesinde yatırım süresi kısaltılarak ekonomik kazanç ve zaman tasarrufu sağlanabilir (Bayram ve Kılınç, 2021).

Yapı değerlendirmelerinde tahribatlı ve tahribatsız muayene yöntemlerinin kullanımı, yapı mühendisliği pratiğinde önemli bir rol oynar. Tahribatlı testler genellikle yapının bir kısmının fiziksel olarak kesilmesi, kırılması veya delinmesini içerir. Bu nedenle hem yapıya zarar verir hem de uygulanabilirliği sınırlıdır. Ayrıca, bu yöntemler genellikle maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu da özellikle mevcut ve işlevsel yapıların değerlendirilmesi sırasında bir dezavantaj oluşturur. Tahribatsız testler ise, yapı üzerinde herhangi bir fiziksel hasar oluşturmada bilgi toplama avantajı sunar. Bu yöntemler daha hızlı, maliyet etkin ve çok sayıda veri elde etmeye olanak tanıdığı için günümüzde daha fazla tercih edilmektedir. Örneğin, Schmidt çekici ve ultrases testleri, beton dayanımını tahmin etmede ve yapının genel durumu hakkında hızlı geri bildirim sağlamada oldukça kullanışlıdır. Ayrıca, NDT yöntemleriyle alınan sonuçların yüksek güvenilirlikte ve tekrarlanabilir olması, yapıların genel sağlık durumu hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme yapılmasını sağlar. Binaların yaşlandığı, hasar gördüğü ya da risk altında olduğu durumlarda NDT yöntemlerinin sağladığı avantajlar, modern yapı mühendisliği pratiklerinde giderek daha fazla değer kazanmaktadır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Hasarsız deney yöntemleri, betonun veya diğer yapı malzemelerinin özelliklerini tespit etmek için kullanılan ve malzeme üzerinde fiziksel bir hasara neden olmayan tekniklerdir.

Bu yöntemler, yapının taşıma kapasitesini veya dayanıklılığını etkilemeden hızlı ve güvenilir sonuçlar elde etmek için tercih edilir. En yaygın kullanılan hasarsız test yöntemleri arasında Schmidt çekici (beton test çekici) ve ultrases geçiş hızı yöntemleri bulunmaktadır. Schmidt çekici yöntemi, beton yüzeyine bir çekicin çarptırılmasıyla elde edilen geri sekme sayısına dayalı olarak betonun yüzey sertliğini ve dolaylı olarak basınç dayanımını ölçer. Bu yöntem, hızlı ve taşınabilir olmasının yanı sıra büyük yüzey alanlarında kullanılabilir. Ultrases geçiş hızı yöntemi, betonun içinden geçen ultrasonik dalgaların hızını ölçerek, betonun homojenliğini, yoğunluğunu ve çatlaklı bölgelerin tespitini sağlar. Dalgaların geçiş hızı, betonun içyapısındaki boşluklar, çatlaklar veya zayıf bölgeler hakkında bilgi verir. Bu iki yöntemin bir arada kullanılması, elde edilen sonuçların doğruluğunu ve güvenilirliğini artırır. Özellikle Schmidt çekici ile yapılan yüzey ölçümlerin ultrases geçiş hızı ile desteklenmesi, betonun içyapısındaki olası sorunların daha iyi analiz edilmesine olanak tanır. Bu kombinasyon, betonun dayanıklılığı, homojenliği ve genel durumu hakkında daha kapsamlı bir değerlendirme sağlar (Özbek ve Canbaz, 2018).

2.2. Tahribatsız Test Yöntemlerinin Başlıca Kullanım Alanları ve Faydaları

Tahribatsız deneyler , yapı mühendisliğinde prekast elemanlardan mevcut beton yapıların durum değerlendirmesine kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Bu yöntemler, hem kalite kontrol hem de uzun dönem dayanıklılığın izlenmesi için vazgeçilmezdir (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

İşte NDT yöntemlerinin başlıca kullanım alanları ve faydaları aşağıda sunulmuştur (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

- *Prekast yapı elemanlarının kalite kontrolü:* Fabrikada üretilen prekast elemanların şantiyede montajından sonra yerinde kontrolü yapılabilir. Bu, elemanların istenen kalite standartlarına uygun olup olmadığını doğrular.
- *Malzeme uygunluğunun belirlenmesi:* Kullanılan betonun veya diğer yapı malzemelerinin istenilen özelliklerde olup olmadığını, şüpheleri ortadan kaldıracak şekilde hızlı ve güvenilir biçimde test eder.
- *Beton işçiliği kalitesinin kontrolü:* Karıştırma, yerleştirme, sıkıştırma ve kürleme gibi süreçlerde yapılan işçiliğin kalitesini değerlendirir. Bu sayede yapıım sırasında oluşabilecek hatalar minimuma indirgenir.

- *Dayanım artışının gözlenmesi:* Kalıpların çıkarılması, kürleme sürecinin bitmesi veya yük etkilerinin ardından betonun dayanımında meydana gelen artışlar NDT yöntemleriyle izlenebilir.
- *Beton elemanlarındaki kusurların tespiti:* Betonun içindeki çatlaklar, boşluklar ve diğer kusurlar bu yöntemlerle tespit edilerek, elemanın yapısal bütünlüğü hakkında bilgi verilir.
- *Tahribatlı testlerden önce betonun uniformluğunun kontrolü:* Tahribatlı testlerden önce betonun genel dayanımı ve yapısal bütünlüğü tahribatsız testlerle değerlendirilerek, maliyetli testlerin sayısı azaltılabilir.
- *Donatıların yer ve durum tespiti:* Beton içindeki donatılar, konumları, miktarları ve korozyona uğrayıp uğramadıkları gibi bilgiler NDT ile belirlenebilir.
- *Bozulmaların tespiti:* Patlamalar, yangınlar, kimyasal saldırılar, aşırı yükleme gibi olaylar sonrası betonun yapısında meydana gelen bozulmalar bu yöntemlerle değerlendirilebilir.
- *Durabilite değerlendirmesi:* Betonun uzun vadede dayanıklılığı ve çevresel etkilere karşı direnci izlenerek, olası hasarlar veya bozulmalar tespit edilebilir.
- *Yapı değişikliklerinde bilgi sağlama:* Yapının kullanım amacı değiştiğinde, örneğin ek yükler veya yeni fonksiyonlar geldiğinde, NDT yöntemleri yapının bu yeni duruma uygun olup olmadığını değerlendirmede yardımcı olur (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

NDT yöntemleri, yapısal analizlerde hasarsız ve düşük maliyetli sonuçlar sunarak mühendislerin güvenilir bilgiye ulaşmasını sağlar. Bu sayede hem maliyetler kontrol altında tutulur hem de yapıların güvenliği artırılır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Tahribatsız test yöntemleri, betonun yerindeki dayanımını belirlemede bazı önemli avantajlar sunar. Tahribatsız yöntemler genellikle daha hızlı ve ekonomik olabilir. Bu testler, betonun yapısında zarar vermeden hızlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Tahribatsız testler, özellikle büyük yapılar ve mevcut binalarda daha pratik ve uygulanabilir çözümler sunar. Betonun geniş alanlarda değerlendirilmesini sağlar. Bu yöntemler, yapıya zarar vermeden uygulandığı için yapının bütünlüğünü korur. Betonun mevcut durumunu değerlendirmek için mevcut beton yapısına müdahale etmez. Tahribatsız yöntemlerin doğruluğu ve hassasiyeti, çeşitli faktörlerden etkilenebilir.

Örneğin, Schmidt çekici yüzey sertliğini ölçerken, ultrases testi betonun içyapısını değerlendirirken, sonuçlar heterojenlik, yüzey koşulları veya betonun yaşına bağlı olarak değişebilir. Tahribatsız testlerin güvenilir sonuçlar vermesi için, genellikle tahribatlı yöntemlerle kalibre edilmesi gerekir. Bu, testlerin doğruluğunu artırmak için ek adımlar gerektirebilir. Tahribatsız test yöntemleri, tahribatlı yöntemlerin yerine geçmekten ziyade, onlara alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu testler, betonun yerindeki dayanımını ve kalitesini pratik bir şekilde değerlendirmek için kullanılır ve daha hızlı ve ekonomik çözümler sunar. Yapıya zarar vermeden değerlendirme yapılmasını sağlar. Büyük ve mevcut yapılar üzerinde uygulanabilir. Bu bağlamda, tahribatlı ve tahribatsız test yöntemlerinin bir arada kullanılması, betonun gerçek dayanımını ve kalitesini daha kapsamlı ve güvenilir bir şekilde belirlemek için ideal bir yaklaşım olabilir. Tahribatsız testler, özellikle betonun mevcut durumunun hızlı bir şekilde değerlendirilmesi gereken durumlarda etkili bir araçtır. Ancak en doğru sonuçları elde etmek için tahribatlı yöntemlerle desteklenmelidir (Aydın ve Sarıbiyık, 2007).

2.3. Beton Test Çekici Testi

Schmidt Çekici, betonun yüzey sertliğini belirlemek için geri tepme prensibi ile çalışan basit ama etkili bir tahribatsız test aracıdır. 1948 yılında Ernst Schmidt tarafından geliştirilen bu cihaz, betonun yüzeyine belirli bir kuvvetle darbe uygulamaktadır ve yüzeye geri tepen çekiğin geri tepme mesafesi ölçülerek betonun yüzey sertliği hakkında bilgi elde edilir. Yukarıda bahsettiğiniz gibi, Schmidt Çekici sadece betonun yüzeyindeki yaklaşık ilk 30 mm'lik kısmı test eder. Bu nedenle betonun derinliklerindeki özellikler hakkında bilgi vermediği için betonun genel dayanımını belirlemede tek başına kullanılması doğru değildir. Diğer yöntemlerle, özellikle ultrasonik testlerle desteklenmesi gereklidir (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Schmidt çekici 1948 yılında Ernst Schmidt tarafından “rebound” prensibini kullanarak yüzey sertliğini göstermek amacıyla icat edilmiştir. Schmidt çekici yaklaşık 1,8 kg ağırlığındadır (Asan ve ark., 2018). Schmidt çekici beton yüzeye bastırıldığında, çekişte sıkışan yay mandal tarafından sabitlenir ve uygulanan yüzeyin mekanik özelliklerine atıfta bulunan bir sayı belirtilir. Schmidt çekicinin temel anlayışı dalga yayılımı prensibine dayanmaktadır. Çekiç bastırıldığında, yüzeydeki piston boyunca bir dalga yayılır. Yüzeyde oluşan tepki kuvveti de yansıyan dalgayı pistonu gönderir. Çekiçteki geri tepme sayıları bu iki dalga genliğinin birbirine oranı ile ilgilidir (Asan ve ark., 2018).

Schmidt çekici yönteminin uygulandığı yüzey temizlenmiş olmalıdır. Numune üzerinde en az 20 mm aralıklarla on okuma yapılmalıdır ve yüzeylerin kenarlarına 40-50 mm'den fazla yaklaşılmamalıdır (Asan ve ark., 2018). Schmidt yöntemi, betonun basınç dayanımını belirlemenin basit, kolay ve ucuz bir yoludur. Bununla birlikte, test sonucunu etkileyen birçok faktör vardır. Örneğin; numunenin geometrisi, yüzeyin pürüzlülüğü, numunenin yaşı, yüzeydeki ve numunedeki nem miktarı, agrega ve çimento özellikleri test sonucunu etkilemektedir (Asan ve ark., 2018).

Schmidt geri tepme çekici esas olarak bir yüzey sertliği test cihazıdır. Elastik bir kütlenin geri tepmesinin, kütlenin çarptığı yüzeyin sertliğine bağlı olduğu prensibine göre çalışmaktadır. Betonun dayanımı ile çekicinin geri tepme sayısı arasında çok az belirgin teorik ilişki vardır. Bununla birlikte, sınırlar dahilinde, dayanım özellikleri ile geri tepme sayısı arasında ampirik korelasyonlar kurulmuştur (Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures, 2002).

Bu yöntemde, betonun yüzey sertliğine dayalı olarak beton dayanımını tahmin etmek için geri tepme çekici veya Schmidt çekici olarak bilinen mekanik bir cihaz kullanılır. Geri tepme sayısı (RN) bu yöntemin çıktısıdır. Bu cihaz, RN'yi betonun basınç dayanımına dönüştürmek için bazı denklemler veya korelasyon eğrileri kullanarak yay yüklü bir kütle beton blok yüzeyine dinamik olarak çarptığında ne kadar enerji yansıtıldığının bir ölçüsünü sağlar. Bununla birlikte, önerilen denklemler UPV yöntemiyle aynı sorun nedeniyle güvenilir değildir. Örneğin, ana sorunlardan biri RN sonuçlarının büyük ölçüde beton yüzey koşullarına bağlı olmasıdır (Alavi ve ark., 2024).

Schmidt çekici deneyi, betonun basınç dayanımını tahribatsız bir şekilde belirlemek amacıyla kullanılan popüler yöntemlerden biridir. Bu deneyde, beton test çekici kullanılır. Test çekici, beton yüzeyine belirli bir kuvvetle uygulanır ve yüzeyin sertliğine bağlı olarak farklı geri sıçrama değerleri elde edilir. Bu geri sıçrama değerleri, betonun yüzey sertliği ve dolayısıyla basınç dayanımı hakkında bilgi verir. Deneyin prensibi, geri sıçrama değerleri ile betonun basınç dayanımı arasında bir ilişki kurulmasıdır. Geri sıçrama ne kadar yüksekse, betonun sertliği ve muhtemelen dayanımı da o kadar yüksektir. Bu ilişkiyi kullanarak, betonun tahmini basınç dayanımı belirlenebilir (Ardahanlı ve Oltulu, 2020).

Geri tepme çekici testi, beton kalitesini kontrol etmek için basit, hızlı ve ucuzdur, ancak güvenilirliğini önemli ölçüde etkileyebilecek bazı dezavantajları ve sınırları vardır. Geri

tepme çekicinin kullanımı sadece betonun dayanımının veya düzenliliğinin tahmin edilmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, fabrika üretiminin izlenmesi bağlamında, tatmin edici bir korelasyon söz konusu olduğunda, geri tepme endeksinin ölçümü iyi bir gösterge olmaya devam etmektedir. Geri tepme çekici testinin sonuçları, yüzey dokusu, beton nemi, agrega türü, çimento türü ve betonun karbonatlaşması gibi faktörlerden etkilenmektedir (Jedidi, 2020).

Beton basınç dayanımını belirlemede kullanılan geri tepmeli beton (Schmidt) çekici, yapı mühendisliğinde oldukça yaygın ve kullanışlı bir araçtır. Bu aracın avantajları, maliyetinin düşük olması, kullanımının kolaylığı ve gözle görülür sonuçlar elde edilebilmesidir. Geri tepmeli beton çekicinin başlıca kullanımları şunlardır (İlhan, 2000):

- *Betonun Üniform Dağılımını Kontrol Etme:* Betonun yapının farklı bölümlerinde homojen bir şekilde dağılıp dağılmadığını belirlemeye yardımcı olur. Bu, yapının genel sağlamlığı ve dayanıklılığı için önemlidir.
- *Betonun Karşılaştırılması:* Farklı yapı elemanlarındaki betonların dayanımını karşılaştırmak için kullanılır. Bu, farklı bölümlerdeki beton kalitesinin tutarlılığını kontrol etmek açısından önemlidir.
- *Beton Basınç Dayanımını Tahmin Etme:* Yüzey sertliğinden yararlanarak betonun basınç dayanımını tahmin etmeye yardımcı olur. Ancak, bu tahminler yüzey koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

Yüzeyin pürüzsüz, temiz ve kuru olması, doğru sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir. Yüzeydeki küçük sıva parçaları veya kirler, ölçüm sonuçlarını etkileyebilir. Bu nedenle, beton çekiciyle yapılacak testlerin sonuçlarının güvenilir olması için yüzeyin uygun koşullarda olması gerekir. Beton çekici ölçümlerinin doğruluğunu artırmak için, yüzey hazırlığına dikkat edilmeli ve gerektiğinde yüzey temizliği yapılmalıdır. Ayrıca, betonun yaşlanma süresi, karışım özellikleri ve çevresel faktörler gibi diğer etmenler de sonuçları etkileyebilir, bu yüzden bu faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır (İlhan, 2000).

Geri tepme çekici testi basit ve düşük maliyetli bir yöntem olduğundan, iyi bilinmektedir ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Schmidt geri tepme çekici testinin yorumlanması, testten elde edilen geri tepme sayısına yansıyan beton basınç dayanımı ile betonun yüzey sertliği arasındaki açık bir ilişkiye dayanmaktadır. Geri tepme değerleri esas olarak

yüzeye yakın tabakadaki beton durumuyla, yaklaşık olarak 3 cm'yi aşmayan derinliklerle ilgilidir (Panedpojaman ve Tonnayopas, 2018).

2.4. Ultrases Hızı Testi

Ultrasonik metot, NDT metotların içinde en yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir. Ses, moleküllerin titreşmesiyle oluşur ve malzemenin içinde dalga olarak ilerler. Vakum ortamda moleküllerin olmaması nedeniyle ses üretimi gerçekleşmez. 20Hz - 20kHz frekans aralığı duyulur ses aralığı, 20 Hz den küçük frekanstaki ses dalgaları infrasonik dalga, 20 kHz den daha yüksek frekanstaki ses dalgaları ultrasonik ses dalgaları olarak isimlendirilirler. Küçük mekanik hareketler moleküllerin denge noktasından ayrılmasına neden olur. Bu etkiler moleküllerin ileri hareket etmesine neden olarak komşu moleküllere iletilmesini sağlar. Bu iletim malzemenin kenarına kadar sürer. Yoğunluğun malzemenin mekanik özellikleri üzerine büyük bir etkisi vardır. Ultra ses dalgasının hızı malzemenin yoğunluğuna bağlıdır. Malzemenin yoğunluğu arttığında ses hızı da artar. Örneğin gaz haldeki havada ses hızı 331 m/sn iken sıvılarda 1-2 bin m/sn civarında, katı haldeki demirde 7-8 bin m/sn civarında ölçülmüştür. Ultrasonik metotta, transdüserler malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini test etmekte kullanılır. Transdüserler, piezo-elektrik kristallerden oluşur. Ultrases dalgası, kristalin rezonans frekansı ile kısa süreli salınımlara neden olacak frekans üretebilecek alternatif akımı kristale uygulayarak üretilebilir. Kristalin rezonans frekansındaki salınımlar veya Ses dalgaları malzemenin içinde ilerleyebilir. Beton ve çelik gibi malzemelerin fiziksel veya mekaniksel özelliklerinin değerlendirilmesinde ultrasonik ses hızı tekniği kullanılmaktadır. Ultrases dalgası elastisite modülünün karekökü ile doğru orantılı ve yoğunluğun karekökü ile ters orantılı olarak değiştiği genel olarak bilinmektedir. Malzemenin elastisite modülünün hesaplanabilmesi için malzemenin dalga ilerleme hızının ve kütlesinin bilinmesi gerekir (Abdullah ve Aydın, 2016).

Ultrases dalga hızı deneyi, betonun dayanımını ve kalitesini tahribatsız bir şekilde belirlemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu deneyde ultrasonik dalgaların numune içindeki yayılma süresi ölçülür. Bu süre, malzeme içerisindeki boşluk oranı, mikro çatlaklar ve kusurlar gibi faktörlerden etkilenir. Cihazın iki transdüseri vardır: biri verici, diğeri ise alıcı olarak görev yapar. Ultrasonik dalgalar, verici tarafından numuneye gönderilir ve alıcı tarafından tespit edilir. Dalgaların iki transdüser arasındaki geçiş süresi mikro saniye (μs) cinsinden ölçülür. Bu ölçüm, malzemenin homojenliği,

yoğunluğu ve içinde bulunan boşlukların miktarı hakkında bilgi verir. Deneyin doğru sonuçlar verebilmesi için, numune yüzeyindeki pürüzlülükler ultrasonik jel kullanılarak minimize edilir. Bu jel, dalgaların numune içerisine daha düzgün bir şekilde iletilmesini sağlar. Deney sonuçları, malzemenin dayanımını ve kalitesini değerlendirmek için kullanılır (Ardahanlı ve Oltulu, 2020).

Ultrases hızı testi ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmasada, betonun yoğunluğunun dayanımla ilişkisi üzerinden dolaylı bir bağ kurulabilir. Betonun yoğunluğu arttıkça, malzeme daha sıkı ve kompakt hale gelir, bu da basınç dayanımını artırır. Özellikle su/çimento (w/c) oranının azalması, beton içindeki kılcal boşlukları azaltır. Bu da betonun yoğunluğunu artırarak dayanımını yükseltir. Ultrases hızı testi, betonun içyapısındaki süreklilik ve boşlukların varlığı hakkında bilgi verir. Eğer beton daha yoğun ve az boşlukluysa, ultrases dalgaları bir probdan diğerine daha hızlı ulaşır. Buda, betonun daha homojen ve güçlü olduğuna dair bir gösterge olabilir. Ancak, ultrases hızı ile dayanım arasındaki ilişkiyi doğrudan belirlemek için betonun diğer fiziksel özelliklerinin ve kompozisyonunun da göz önünde bulundurulması gerekir. Bu nedenle, ultrases hızı testi, Schmidt Çekici ile yapılan yüzey sertliği ölçümleri gibi, tek başına beton dayanımını belirlemek için yetersiz olabilir. Ancak diğer tahribatsız testlerle birlikte kullanıldığında daha bütünsel bir değerlendirme yapılabilir (Abbazadeh ve Güneş, 2018).

Ultrases hızı testi, betonun içyapısının homojenliği ve boşlukların varlığı hakkında bilgi veren etkili bir tahribatsız test yöntemidir. Bu testte, ses dalgalarının betonda ilerleme hızları ölçülerek betonun içsel yapısı değerlendirilir. Uygulama, iki prob arasında ses dalgalarının yayılma süresini temel alır (Abbazadeh ve Güneş, 2018). Ultrases hızı testinde iki ultrasonik prob, test edilecek beton yüzeyine yerleştirilir. Probların betona temasını iyileştirmek ve dalgaların etkili bir şekilde aktarılmasını sağlamak için gres yağı, silikon veya benzeri bir viskoz madde kullanılır. Bu maddeler, yüzeydeki hava boşluklarını ortadan kaldırarak ses dalgalarının daha hızlı ve doğru bir şekilde iletilmesini sağlar. Gönderici prob, betona boyuna ve kesme dalgaları olarak bilinen ses dalgalarını yollar. Bu dalgaların boyuna olanları daha hızlıdır, çünkü materyalde en az kayıpla ilerlerler. Dalgalar beton içinde ilerlerken elektronik bir saat çalışmaya başlar. Alıcı prob dalgayı algıladığı anda saat durur ve ses dalgalarının iki prob arasındaki mesafeyi kat etme süresi kaydedilir. Probların arasındaki mesafe bilindiği için, dalgaların bu mesafeyi

kat etme süresiyle bölünmesi sonucunda dalga hızı hesaplanır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018). Denklem (1)'de ultrases hızı formülü sunulmuştur;

$$V=L/T \quad (2.1)$$

V: Ultrasonik dalga hızı (m/s)

L: Prob arasındaki mesafe (m)

t: Dalgaların bu mesafeyi katetme süresi (s)

Bu hız, betonun yoğunluğu ve homojenliği hakkında önemli bilgiler sunar. Yüksek hızlar, genellikle betonun daha homojen, yoğun ve güçlü olduğunu gösterir. Düşük hızlar ise beton içinde boşluklar veya zayıflıklar bulunduğunu işaret edebilir (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Ultrases testi araştırmalarında, beton numunelerine uygulanan gerilmelerin belirli bir seviyeye ulaşana kadar ultrases hızında anlamlı bir değişiklik görülmediği ifade edilmiştir. Genellikle, numune üzerindeki gerilme kırılma yükünün % 50'sine ulaşmadan ultrases dalgalarının hızında bir değişiklik oluşmaz. Bu aşamada betonun içyapısı henüz önemli ölçüde etkilenmediği için, dalgalar boşluklar veya çatlaklar olmaksızın serbestçe ilerleyebilir. Yükleme arttıkça ve numune üzerindeki gerilmeler kritik seviyelere yaklaştıkça, betonun içyapısında mikro çatlaklar ve deformasyonlar oluşmaya başlar. Bu deformasyonlar, betonda boşluklar yaratır ve ultrases dalgalarının yayılma hızını etkiler. Ses dalgaları bu boşluklarla karşılaştığında, dalgalar bu boşluklardan ya tamamen yansır ya da yön değiştirerek etrafından dolaşmak zorunda kalır. Bu da ses dalgalarının alıcı proba ulaşma süresini uzatır ve dalga hızının düşmesine sebep olur. Sonuç olarak betonun içindeki mikro çatlaklar ve boşlukların oluşumu dalga yayılımı üzerinde doğrudan etkilidir. Boşlukların artması, malzemenin homojenliğini bozarak ultrasonik dalgaların hızını düşürür. Bu sayede, ultrasonik testlerle betonun içsel deformasyonlarını ve yapısal bütünlük kaybını tespit etmek mümkün hale gelir (Abbaszadeh ve Güneş, 2018). Ultrases testi yalnızca yüzeysel çatlakları değil, aynı zamanda yükleme sırasında numunelerde oluşan içsel deformasyonları da tespit edebilme kapasitesine sahiptir. Bu özellik, betonun yük altında nasıl bir yapısal değişim geçirdiğini anlamada önemli bir araçtır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Beton numunelerinin doygunluk durumuna göre ultrases hızı değişiklik gösterir. Doymuş haldeki beton numuneler, ses dalgalarının su dolu boşluklarda daha kolay ve hızlı yayılmasından dolayı kuru numunelere göre daha yüksek ultrases hızları verir. Bunun

nedeni, suyun betondaki boşlukları doldurarak, ses dalgalarının su üzerinden daha verimli bir şekilde iletilmesidir. Su, betonun gözeneklerini ve mikro boşluklarını doldurduğunda, bu boşluklar ses dalgalarının yayılımını kolaylaştırır. Ses dalgaları hava yerine su içinde daha hızlı ilerler. Bu nedenle, doymuş numunelerde ultrases hızı, kuru numunelere göre yaklaşık %5 daha yüksek olur. Doymuş numunelerde ultrases hızları yüksek olmasına rağmen, betonun dayanımı genellikle kuru numunelere göre daha düşüktür. Bunun sebebi, suyun betonun içinde zayıf noktalar oluşturması ve boşlukları doldurmasına rağmen, mekanik dayanım anlamında zayıflıklar yaratmasıdır. Su, betonun mikro yapısını zayıflatarak numunenin çatlamaya veya kırılmaya karşı direncini azaltır. Bu nedenle, doymuş numuneler daha yüksek ultrases hızlarına rağmen daha düşük dayanım değerleri verir. Kuru numuneler, boşluklarının çoğunu hava ile dolu tutar ve bu da ses dalgalarının yayılmasını zorlaştırır. Bu yüzden kuru numunelerde ultrases hızı daha düşüktür. Ancak, mekanik anlamda, suyun varlığına bağlı içsel zayıflıklar olmadığı için kuru numuneler daha yüksek dayanım gösterirler. Betondaki dayanım arttıkça, beton daha kompakt ve homojen hale gelir. Bu durumda, suyun varlığı veya yokluğu ultrases hızı üzerindeki etkisini giderek kaybeder. Dayanımı yüksek betonlar, genellikle daha az boşluk ve kusur içerir. Bu da suyun etkisini en aza indirir ve doymuş ya da kuru durumda olsa bile ultrases hızı farkı gözlenmez hale gelir. Sonuç olarak, ultrases hızı ve dayanım arasındaki ilişki, betonun nem durumu ve içsel yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Doymuş numuneler yüksek ultrases hızı verirken, dayanımları genellikle düşük olur. Kuru numunelerde ise düşük ultrases hızı ile yüksek dayanım elde edilir. Bu fark, yüksek dayanımlı betonlarda belirgin olmaktan çıkar (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Ultrases hızının ölçümünde alıcı ve verici problar arasındaki mesafenin artması, dalgaların yayılma hızının büyüklüğünü doğrudan etkilemez. Ancak, prob yerleştirme mesafesi, betonun iç yapısının düzgün bir şekilde ölçülebilmesi için önemlidir. Ultrases testi sırasında dalgaların düzgün yayılabilmesi ve doğru sonuçlar elde edilebilmesi için prob yerleştirme mesafesinin betonun iç yapısına, özellikle de agregaların boyutuna uygun şekilde ayarlanması gereklidir. Problar arası mesafenin doğru seçilmesi, ses dalgalarının beton içerisinde düzgün bir şekilde yayılmasını sağlar. Eğer mesafe çok kısa olursa, dalgalar betonda homojen bir yol izleyemeyebilir ve yerel yapısal özelliklerden (örneğin büyük agregalar ya da boşluklar) etkilenebilir. Betonun içindeki agregaların çapı, ses dalgalarının yolunu etkiler. Büyük agregalar, dalgaların yönünü değiştirebilir ya da enerjilerini soğurabilir. Bu yüzden, büyük agregalı betonlarda problar arasındaki mesafe

daha uzun tutulmalıdır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018). Maksimum agregâ çapı 20 mm veya daha küçük olan betonlar için problemlerin arası mesafe en az 100 mm olmalıdır. Bu mesafe, küçük agregaların dalga yayılımını etkilemeden daha tutarlı sonuçlar alınmasını sağlar. Maksimum agregâ çapı 20-40 mm arasında olan betonlar için ise, problemlerin arası mesafe en az 150 mm olmalıdır. Daha büyük agregalar olduğunda, dalgaların bu agregalar etrafında yön değiştirme ihtimali artar. Bu nedenle problemlerin arası mesafenin artırılması gerekir. Sonuç olarak problemlerin arası mesafe ultrases hızının doğruluğunu artırmak için agregâ boyutuna uygun şekilde ayarlanmalıdır. Daha büyük agregalar, daha uzun prob mesafesi gerektirir. Ancak, prob mesafesinin artırılması, dalga hızının büyüklüğünü etkilemez. Sadece ölçümün doğruluğunu sağlar (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Betonun UPV sonuçlarına göre karşılaştırılması tablosu aşağıda sunulmuştur (Ardahanlı ve Oltulu, 2020);

Çizelge 2.1. Betonun UPV sonuçlarına göre karşılaştırılması (Ardahanlı ve Oltulu, 2020)

Ultrases hızı (km/sn)	Beton kalitesi
>4,5	Çok iyi
3,5-4,5	İyi
3-3,5	Orta
<3	Kötü

Ultrasonik dalga hızı testinin betonun basınç dayanımı ile doğrudan bir ilişkisi yoktur. Ancak betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasında bir ilişki olduğu bilinmektedir. Çoğu durumda, betonun yoğunluğu arttıkça betonun basınç dayanımı da artar. Eğer w/c oranında azalma meydana gelirse, betondaki kılcal gözenek miktarı azalacaktır. Bu nedenle, kılcal gözenek miktarı azalırsa, UPV cihazının iki probu arasındaki ses dalgalarının alınma süresi azalacaktır. Problemler tarafından üretilen ses dalgalarının beton içinde yayılma süresinin ölçümü ultrasonik dalga hızı testini tanımlamaktadır. Problemler tarafından üretilen ses dalgaları betondan geçer. Problemlerde dalga hareketi başladığında bir saat çalışmaya başlar. İlk dalga proba çarptığında saat durur ve alma süresi ölçülür. Dalga hızına, dalgaların alınma süresi ile kat edilen mesafenin oranı ile ulaşılır. Ultrasonik dalga hızı sonuçlarını etkileyen faktörler agregâ özellikleri, çimento tipi, katkıları ve betonun olgunluğudur (Asan ve ark., 2018).

2.5. Kombine SonReb Yöntemi

Bir dizi tamamen tahribatsız testler arasında, geri tepme (Schmidt) çekici testi ve ultrasonik dalga hızı testi kombinasyonları en yaygın kullanılanlardır. Çoğu durumda, yerinde beton dayanımı değerlendirme ihtiyacı, betonun kalitesinden şüphe duyulmasının bir sonucu olarak ortaya çıkar. Sadece iri agrega kaynağı ve geniş bir yaş grubu ortak olan bir dizi beton sınıfı ve tipi için önceden bir korelasyon geliştirerek, standart bir laboratuvar basınç numunesinin test sonucunun değeri olarak ifade edilen betonun yerinde dayanımı hakkında iyi bir gösterge elde etmek mümkündür (Malhotra ve Carino, 2004).

Birleşik yöntemlerin kullanımı genellikle yalnızca söz konusu kaliteli betonun değerlendirilmesinden önce belirli bir beton türü için güvenilir bir korelasyon geliştirilmişse haklı görülebilir. Tek bir tahribatsız teste kıyasla kombine bir testin güvenilirliği daha yüksektir (Malhotra ve Carino, 2004).

SonReb yöntemi, betonarme binalarda yerinde beton dayanımını hızlı ve tahribatsız bir şekilde tahmin etmek için kullanılan etkili bir tekniktir. Bu yöntem, Schmidt çekici ve ultrases geçiş hızı ölçümlerinin bileşik değerlendirmesine dayanır. Yapılan ölçümler, laboratuvar ortamında oluşturulan eş-dayanım eğrileriyle betonun basınç dayanımına dönüştürülmektedir. Ayrıca, binanın uygun noktalarından alınan karotiyer örnekleriyle tahribatlı testler gerçekleştirilerek, tahribatlı ve tahribatsız sonuçlar karşılaştırılmaktadır. SonReb yönteminin en önemli avantajı, farklı ölçüm tekniklerinin birlikte kullanılmasının sağladığı doğruluğun artmasıdır; bu sayede her bir yöntemin bireysel olarak taşıdığı hata oranları minimize edilir. Böylece, yerinde beton dayanım tahmini yapılırken yapıya zarar vermeden güvenilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olmaktadır (Yüksel, 2003).

Beton basınç dayanımının tahmin edilmesinin doğruluğunu artırmak için en yaygın kullanılan iki tahribatsız test yöntemi söz konusudur. Bu bağlamda teori elde edilen ölçümler ile beklenen değer arasındaki karşılaştırmalara odaklanmaktadır. En sık benimsenen standart kombinasyon yöntemi, ilk olarak Romanya'da geliştirilen ve Avrupa ve Avustralya'da uygulanan RILEM tarafından sağlanan SonReb tekniği olmuştur (Chandak ve Kumavat, 2020).

Beton dayanımı f_c 'yi eş zamanlı olarak Rebound sayısı R ve ultrasonik dalga hızı V ile ilişkilendirme ve böylece SonReb yöntemini ortaya çıkarma fikri, Facaoaru sayesinde 1970'lerin başına dayanmaktadır. Bugüne kadar farklı korelasyon formülleri

kullanılmıştır. Doğrusal, polinom, üstel vb. arasında değişen çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlar arasında literatürde SonReb yöntemi için en yaygın kabul gören korelasyon yüzeylerinden biri aşağıdaki genel forma sahiptir. Denklem (2)'de SonReb formülü sunulmuştur (Breccolotti ve Bonfigli, 2015);

$$f_c(V, R) = a_1 \cdot V^{a_2} \cdot R^{a_3} \quad (2.2)$$

V: Ultrasonik dalga hızı (m/s)

R: Schmidt çekici geri tepme sayısı

a_1 , a_2 ve a_3 : Seçilen formülde ki sabit kat sayı

SonReb, RILEM teknik komiteleri tarafından mühendisler tanıtılan UPV ve RN kombinasyonudur. İki farklı yöntemin birleştirilmesiyle elde edilen sonuçlar, ikincil parametrelerin etkilerine karşı her bir yöntemden daha az duyarlıdır. Bu durum geçtiğimiz yıllarda mühendislerin ve araştırmacıların dikkatini çekmiştir ve SonReb sonuçlarını beton basınç dayanımına dönüştürmek için çeşitli denklemler sunulmuştur. Bununla birlikte, bu denklemlerin doğruluğu farklı veri kümeleri arasında değişmektedir. Bu da performanslarını önce karot testleriyle kalibre etmeden kullanılmalarını imkansız hale getirmektedir (Alavi ve ark., 2024).

Geri tepme çekici ve ultrasonik dalga hızı ile ölçüm test edilen malzemenin bileşenleri ve bileşimi, nem içeriği, test sırasında malzemenin sıcaklığı, test edilen alanın yüzeyinin durumu, malzemenin iç kusurları gibi faktörlerden etkilenir (Brozovsky, 2014).

Kombine tahribatsız yöntemlerden elde edilen veriler, bir malzeme veya ürünün izlenen özelliğini daha doğru bir şekilde tanımlamaktadır. Örneğin, betonun dayanım özellikleri, beton bileşenleri, harmanlama hassasiyeti, üretim teknolojisi, beton dökümü sırasında işleme şekli ve iklim koşulları ve sertleşmiş betonun nasıl işlendiği gibi çeşitli faktörlerden etkilenir (Brozovsky, 2014).

Kombine tahribatsız yöntem kullanılarak yapılan testler için, eğer iki değişken arasında belirli bir derecede korelasyon bağımlılığı varsa, bir ve iki değişken arasındaki çoklu korelasyon bağımlılığının daha yüksek bir korelasyon derecesi göstereceği varsayılabilir (Brozovsky, 2014). Kombine tahribatsız yöntemler geri tepme çekici yöntemi kullanılarak yapılan testlere ve ultrasonik dalga hızı yöntemlerine dayanmaktadır. Her iki yöntemin birlikte uygulanmasıyla SonReb yöntemi ortaya çıkmaktadır. SonReb yöntemi

çoğunlukla betonun basınç dayanımını belirlemek için geliştirilmiştir. Test metodolojisi NDT 4 RILEM direktifinde belirtilmiştir (Brozovsky, 2014).

Geri sıçrama ve ultrasonik yöntemlerin bir arada kullanılması, iki yöntemin de eksiklerini tamamlayarak daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. Bu kombinasyon yöntemi, literatürde "Birleşik Yöntem" veya "SonReb" (Schmidt rebound hammer ve ultrasonic pulse velocity kelimelerinin kısaltmasından türetilmiştir) olarak bilinir. SonReb yöntemi, geri sıçrama testi ile elde edilen yüzey sertliği verilerini ve ultrasonik hız testi ile elde edilen iç yapı bilgilerini bir araya getirerek, betonun basınç dayanımı tahmininde daha az hata payı sunar. Bu yöntemde, her iki testten elde edilen veriler regresyon analizleri veya istatistiksel modellerle birleştirilir, böylece her iki yöntemin de avantajlarından yararlanılarak daha güvenilir bir basınç dayanımı tahmini yapılır. SonReb yöntemi özellikle betonarme yapıların yerinde değerlendirilmesi ve tahribatsız muayene gerektiren durumlarda sıklıkla tercih edilir (Başka ve Ekmekyapar, 2006). Betonda geri sıçrama değeri ile ultrasonik dalga hızı değerlerinin birlikte değerlendirilmesi yoluyla betonun basınç dayanımını tahmin etmek amacıyla birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, iki yöntemin kombinasyonundan elde edilen verilerin analiz edilmesiyle çeşitli ampirik ilişkiler ve formüller geliştirmiştir. Aşağıda, bu çalışmalardan bazılarına dayanan temel yaklaşımlar açıklanmaktadır (Başka ve Ekmekyapar, 2006):

- *Doğrusal Regresyon Yöntemi*: Birçok araştırma, geri sıçrama değeri ve ultrasonik hız arasında doğrusal bir ilişki kurarak basınç dayanımı tahmini yapar. Bu yöntemde, basınç dayanımı, her iki test sonucunun sabit katsayılarla çarpıldığı bir doğrusal denkleme dayandırılır. Bu sayede, her iki ölçüm sonucu ayrı ayrı dayanım tahmini yapmak yerine, iki ölçümden elde edilen kombinasyon daha isabetli tahminler sağlar.
- *Çoklu Regresyon Analizi*: Bu yaklaşımda, geri sıçrama ve ultrasonik hız değerleri ile basınç dayanımı arasında daha karmaşık bir ilişki kurulur. Genellikle, iki değişkeni ve bunların etkileşimlerini içeren çoklu regresyon modeli kullanılarak daha kapsamlı bir denkleme ulaşılır. Böylece, betonun yoğunluk, boşluk oranı gibi faktörlerin etkileri de dikkate alınarak tahmin doğruluğu artırılabilir.
- *Ampirik Formüller*: Bazı çalışmalarda, belirli beton tipleri veya agregalar için özel olarak geliştirilmiş ampirik formüller kullanılır. Bu formüller, geri sıçrama değeri ve ultrasonik dalga hızını baz alarak, belirli beton bileşimleri ve sertleşme koşullarına uygun katsayılarla özelleştirilmiştir. Örneğin, belirli agrega türleri

veya su/çimento oranlarına göre değişen katsayılar içeren formüller geliştirilmiştir.

- *Grafiksel Yaklaşımlar:* Çeşitli çalışmalarda, geri sıçrama ve ultrasonik hız değerlerine göre belirli basınç dayanımlarının tahmin edilebildiği grafikler sunulmuştur. Bu grafiklerde, farklı dayanım sınıfları için geri sıçrama ve ultrasonik hız kombinasyonlarına dayalı aralıklar belirtilmiştir. Bu yaklaşımlar, hızlı bir şekilde basınç dayanımı tahmini yapmaya olanak sağlar.

Bu tür yaklaşımlar, SonReb yönteminin avantajlarını ortaya koyar. Özellikle her iki yöntemin birleştirilmesi, betonun homojen olmayan yapısından kaynaklanan tahmin hatalarını azaltır (Başka ve Ekmekyapar, 2006).

Türkiye'de en yaygın olarak kullanılan tahribatsız (yıkıntısız) test yöntemleri arasında beton test çekici, ultrasonik yöntem ve birleşik yöntem (SonReb) öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerin tercih edilmesinde, maliyetlerin daha düşük olması, testlerin hızlı ve kolay yapılabilmesi, yapı içindeki farklı beton bölgelerinin aynı nitelikte olup olmadığının kolayca denetlenebilmesi gibi avantajlar etkilidir. Bu özellikler sayesinde tahribatsız testler, beton kalitesini yerinde değerlendirmek için pratik bir çözüm sunar. Ancak, tahribatsız yöntemler betonun basınç dayanımını yalnızca yaklaşık olarak verir ve hata payı yüksek olabilmektedir. Örneğin, beton test çekici yönteminde basınç dayanımı tahmini $\pm\%$ 20 hata payına sahip olabilir. Bu hata oranı, beton dayanımının tam olarak belirlenmesini engeller ve elde edilen sonuçların yeterince güvenilir olmamasına neden olur. Tahribatsız yöntemler betonun iç yapısının homojenliği, boşluk oranı ve yoğunluk gibi özelliklerini sınırlı ölçüde yansıtabilir, bu nedenle betonun yerinde dayanımını sağlıklı bir şekilde temsil edemeyebilir (Başka ve Ekmekyapar, 2006).

Beton test çekici yöntemi, sertleşmiş betonun yüzeyine bir çekicinin belirli bir kuvvetle darbe uygulaması ve geri sıçrama değerinin ölçülmesi prensibine dayanır. Beton yüzeyine uygulanan bu darbeye çekicinin geri sıçrama mesafesi kaydedilir ve birden fazla noktada yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak basınç dayanımı yaklaşık olarak tahmin edilir. Geri sıçrama değeri, beton yüzeyinin sertliği ile doğrudan ilişkili olduğundan, yüzey sertliği yüksek olan betonlar genellikle daha yüksek geri sıçrama değerlerine sahiptir. Ancak bu yöntem sadece beton yüzeyine yönelik bir ölçüm sunduğu için yüzey altındaki yoğunluk, boşluk oranı gibi iç yapı özellikleri hakkında bilgi vermez ve bu nedenle basınç dayanımı tahmini, yalnızca yaklaşık sonuçlar sunabilir (Başka ve Ekmekyapar, 2006).

Ultrasonik yöntemde, beton içerisine gönderilen yüksek frekanslı ses dalgalarının betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresi ölçülür. Ultrasonik dalga hızı, gönderilen dalga kat ettiği mesafe ile ölçülen geçiş süresi kullanılarak hesaplanır. Dalga hızı, betonun yoğunluk ve boşluk oranları gibi özellikleriyle yakından ilişkili olup, daha yoğun ve homojen yapıya sahip betonlarda daha yüksek değerlere ulaşır. Bu dalga hızı ile betonun basınç dayanımı arasında ampirik bir ilişki kurularak basınç dayanımı yaklaşık olarak tahmin edilebilir. Ancak ultrasonik dalga hızı, betonun iç yapısına dair bilgiler sunsa da, yüzeyin sertliğini doğrudan ölçmez. Bu nedenle, yalnızca dalga hızına dayalı olarak yapılan basınç dayanımı tahmini, belirli bir hata payı taşır. Yine de ultrasonik yöntem, beton içindeki boşluklar ve homojenliği hakkında değerli bilgiler sağlayarak dayanım değerlendirmesine katkı sunar (Başka ve Ekmekyapar, 2006).

Birleşik yöntem (SonReb), betonun basınç dayanımını daha doğru tahmin edebilmek için beton test çekici (geri sıçrama) ve ultrasonik yöntemlerin birlikte kullanıldığı bir yaklaşımdır. Bu yöntem, her iki ölçümün farklı beton özelliklerini yansıttığı için, her birinin eksik kaldığı noktalarda diğerinin devreye girmesini sağlar. Beton test çekici yöntemi, beton yüzeyinin sertliğini değerlendirirken geri sıçrama değerini kullanır. Bu değer, yüzey sertliğini etkileyen bazı faktörlerden etkilenir; örneğin, beton yüzeyinde meydana gelen karbonatlaşma, geri sıçrama değerini artırabilir. Öte yandan, ultrasonik dalga hızı, betonun yoğunluğunu ve iç yapısındaki boşlukları etkileyen faktörleri yansıtır; bu nedenle betonun iç homojenliğini değerlendirmeye katkı sağlar (Başka ve Ekmekyapar, 2006).

En çok kullanılan NDT yöntemlerinden biri, Rebound Hammer (RH) ve Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) testlerinin sonuçlarının birleştirilmesinden oluşur. Bu prosedür SonReb yöntemi olarak bilinir. RILEM 43 CND'ye (RILEM Taslak Tavsiyesi, 1993) göre, beton basınç dayanımının tahmini için SonReb kombine yönteminin kullanımı aşağıdakilerle sahip olabilir (Chingalata ve ark., 2017):

- RH ve UPV test yöntemleri uygulanarak, basınç dayanımı sırasıyla hem yüzey hem de derinlemesine seviyelerde değerlendirilir.
- Testler hızlı bir şekilde gerçekleştirilir.
- Her iki yöntem de basınç dayanımının tahmininde benzer bir doğruluk düzeyi sağlamalıdır.
- Her iki test de tahribatsız olduğundan, özel testlere gerek yoktur.
- Beton elemanlar test prosedürü sırasında hasar görmemelidir.

SonReb yöntemi, iki basit tahribatsız yöntem olan geri tepme çekici (RH) ve ultrasonik dalga hızının (UPV) kombinasyonundan oluşur. Bu yaklaşım çoğunlukla basınç etkisinin tahmini için kullanılır. Yöntem, RILEM Teknik Komiteleri tarafından Romanyalı mühendis I. Facaoaru tarafından yürütülen araştırmaya dayanarak geliştirilmiştir (Chingalata ve ark., 2017).

RH ve UPV testleri tarafından sağlanan sonuçlar aşağıdakilerden etkilenebilir (Chingalata ve ark., 2017).

- *İncelenen beton elemana bağlı olarak yeterince büyük faktörler kümesi:* Örneğin, NDT yöntemleriyle belirlenen beton basınç dayanımının agrega boyutuyla birlikte arttığı ve böylece geleneksel yöntemlerle belirlenen gerçek dayanımlardan daha yüksek dayanımlar verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca nem içeriği, ultrasonik dalganın hızını artırarak ve geri tepme sayısını azaltarak SonReb prosedüründe uygulanan iki NDT yöntemi üzerinde ters bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, SonReb yöntemi tarafından sağlanan basınç dayanımı değerleri, aynı parametrenin basit tahribatsız yöntem sonuçları üzerindeki ters etkisine dayanarak, basit yöntemlerle elde edilenlere kıyasla daha doğrudur. Böylece SonReb yöntemi uygulanarak belirlenen basınç dayanımı değerlerinin doğruluğunun artması, indüklenen hatalar için kendi kendini düzeltme mekanizmasının bir sonucudur (Chingalata ve ark., 2017).
- SonReb yöntemi için önerilen matematiksel modeller iki genel kategoriye ayrılabilir. Bunlardan ilki, yalnızca RH ve UPV yöntemleri tarafından sağlanan deneysel sonuçlara dayanarak betonun basınç dayanımını tahmin eden modellerdir. İkinci kategori betonun bileşimsel ve fiziksel özelliklerini (yaş, çimento üzerindeki su ve çimento üzerindeki agrega oranları, nem içeriği, sıcaklık vb.) tanımlayan ek bir dizi parametreyi dikkate alan daha karmaşık modellere atıfta bulunmaktadır (Chingalata ve ark., 2017).

RH ve UPV yöntemlerini birleştirmenin en önemli avantajı, incelenen malzemenin derinlemesine bir tanımını elde etmektir. Böylece, dayanım sağlayan bir yüzey sertliği yönteminin (RH) kombinasyonu elemanın iç tarafını karakterize eden UPV yöntemi ile yaklaşık 2-3 cm derinlikte betonun dış tarafı için değerler, beton elemanın basınç dayanımının değerlendirilmesindeki doğruluğu artırabilir (Chingalata ve ark., 2017).

SonReb yöntemi, mevcut yapılarda beton basınç dayanımının yerinde değerlendirilmesi için en çok kullanılan NDT tekniklerinden biridir. Malzeme dayanımını değerlendirmek için ultrasonik modül hızı (UPV) ve geri tepme çekici ölçümlerinin birleştirilmesinden oluşur ve dayanım tahminlerinin güvenilirliğini artırır. UPV yöntemi, mekanik özelliklerin tahmini için güvenilir bir araç sağlar. Yayılımlarının test edilen malzemelerin yoğunluğuna ve elastisite modülüne güçlü bir şekilde bağlı olduğu ultrasonik dalgaların gönderilmesi ve alınmasından oluşur. Ayrıca, rebound çekiç testi beton yüzeyinin sertliğini ölçer. Bununla birlikte, çalışmalar geri tepme okuma sonuçlarının yüzeye yakın mekanik özelliklere duyarlı olduğunu ve yüzey düzgünlüğü, betonun yaşı gibi faktörlerden etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, geri tepme sayısı (R) ile beton basınç dayanımı arasında net bir teorik ilişki formüle edilmemiştir (Eddin ve ark., 2022).

RH ve UPV ölçümlerine sahip olmak, beton dayanımını tahmin etmek için kombine SonReb yönteminin uygulanmasına olanak tanır. Bu yöntemi kullanmanın avantajı, bazı beton parametrelerindeki değişimin iki bileşen testinin sonuçları üzerinde zıt etkiler yaratması ve beton dayanımı tahminindeki hatayı azaltmasıdır. Özellikle, SonReb yöntemi agrega boyutu, çimento tipi ve içeriği, su-çimento oranı ve nem içeriğine bağlı etkileri azaltır. Ayrıca bu durumda, tahribatlı test sonuçları dikkate alınarak beton dayanımının belirlenmesi için güvenilir bir ilişki elde edilmelidir. Ancak, SonReb yöntemiyle beton dayanımını belirlemek için literatürde çeşitli ilişkiler mevcuttur. Dolayısıyla, tahribatlı test sonuçları üzerinde geçici bir ilişkiyi kalibre etmeden, bu sonuçları en iyi tahmin eden mevcut ilişkiyi kullanmak da mümkündür (Frappa ve ark., 2022).

Betonarme yapılarda en önemli özellikler - diğerlerinin yanı sıra - beton basınç dayanımı, beton durumu ve çelik donatıların akma dayanımıdır. Beton basınç dayanımı sayesinde, elastisite modülü, çekme dayanımı ve dayanıklılık gibi diğer beton özellikleri elde edilebilir. Bunu yapmak için, “tahribatlı” yöntemler (malzemenin yerel olarak çıkarılmasını gerektiren) ve sklerometre testi, ultrasonik test ve kombine test gibi “tahribatsız” testler kullanılır. SonReb yöntemi kombine bir test yöntemidir (Guida ve ark., 2011). Farklı “tahribatsız” testlerden elde edilen birleşik sonuçlar, beton dayanımını değerlendirmek için çok ilginç araçlardır. Bu metodolojik yaklaşım, sklerometre ve ultrasonik testleri ayrı ayrı kullanırken olası hataları azaltmaya yardımcı olabilir. Bu şekilde “SonReb” (Sonic+Rebound) adı verilen birleşik yöntem geliştirilmiştir (Guida ve ark., 2011). Aslında, bir yapı elemanının nem içeriğinin sklerometre indeksini ve aynı

zamanda ultrasonik hızı etkileyebileceği fark edilmiştir. Kombine bir yöntem kullanarak, iki metodoloji ayrı ayrı kullanıldığında yapılan bazı hataları dengelemek mümkündür. Ayrıca, bu kombine yöntem sonuçları elde etmek için kısa bir süre gerektirir, yapısal elemanların direncini etkilemez (Guida ve ark., 2011).

Yıllardır, iki NDT tekniğinin birleştirilmesi kavramı üzerinde çalışılmaktadır. En popüler yöntem SonReb olarak adlandırılır. Beton basınç dayanımını değerlendirmek için ultrasonik dalga hızı tekniği ile geri tepme çekici tekniği arasındaki kombinasyon esas alınmaktadır. Bu kombinasyon, birçok laboratuvarın ve değerlendirme kalitesini artırmayı amaçlayan gerçek yapı çalışmalarının odak noktası olmuştur. Bu kombinasyondaki ilgi çekici nokta, ultrasonik dalga hızı ve geri tepme değerinin su içeriğine olan ters hassasiyetidir. Aslında, ıslak betonda ultrasonik dalga hızı artarken, kuru beton durumuna kıyasla geri tepme sayısı azalmaktadır. Beton dayanımını ultrasonik dalga hızı veya geri tepme indeksi ile ilişkilendiren model, su içeriği değişimi kontrol edilmezse yanlış olabilir. Bu nedenle, bu iki gösterge eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Bunu yapmanın yolu iki tekniğin kombinasyonu olabilir. Bununla birlikte, NDT'nin birleştirilmesinden oluşan yöntem, yalnızca kombinasyondan kaynaklanan ek maliyetler değerlendirmenin güvenilirliğindeki bir iyileşme ile telafi edilirse umut vericidir (Kouddane ve ark., 2022).

SonReb yöntemi, ultrasesi kullanmanın ek bir yolu olabilir (Ladefoged, 2023). Beton basınç dayanımını f_c tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri arasında geri tepme çekici testi ve ultrasonik dalga hızı (UPV) testi bulunmaktadır. Geri tepme çekici ve ultrasonik dalga hızı yöntemlerinin farklı yönlerden kaynaklanan zayıf güvenilirliği, her iki yöntemin birlikte kullanılmasıyla kısmen giderilebilir. Uygulamada en çok kullanılan NDT kombine yöntemlerinden biri, RILEM Teknik Komiteleri 7 NDT ve TC-43 CND tarafından geliştirilen SonReb yöntemidir (Nobile ve Bonagura, 2016).



3. KONU İLE İLGİLİ ÖNCEDEN YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Abbaszadeh ve Güneş 2018 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada betonarme binaların durum değerlendirmesinin, gerçekten de yapı mühendisliğinde kritik bir alan olduğunu vurugulamıştır. Bu değerlendirmenin, binaların güvenliğini sağlamak ve bakım planlamalarını yapmak açısından büyük önem taşıdığını belirtmiştir. Aynı zamanda yapısal analizlerin tahribatsız test yöntemleriyle desteklenmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. Özellikle Schmidt çekici ve ultrases testleri gibi yöntemlerin, beton kalitesinin ve yapısal bütünlüğün belirlenmesinde faydalı olabileceğini belirtmişlerdir (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Abbaszadeh ve Güneş'in 2018 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada 10 °C ile 30 °C arasındaki sıcaklık değişimlerinin, betonun dayanımı ve elastik özelliklerinde bir değişikliğe yol açmadığı sürece, ultrases hızı üzerinde önemli bir etki yaratmadığı bilinmektedir. Bu sıcaklık aralığı, beton gibi malzemeler için genellikle yeterince stabil kabul edilir ve bu nedenle ultrases dalgalarının yayılma hızı büyük ölçüde sabit kalır. Ultrases hızı, betonun içyapısındaki elastik özelliklere, yoğunluğa ve boşluk dağılımına bağlıdır. 10 °C-30 °C sıcaklık aralığında betonun bu fiziksel ve elastik özelliklerinde önemli bir değişiklik meydana gelmezse, ses dalgalarının yayılma hızı da bu sıcaklık değişiminden çok fazla etkilenmez. Beton gibi malzemeler, belirli bir sıcaklık aralığında termal olarak stabildir. Bu aralıkta, betondaki iç yapısal bileşenler (agregalar, çimento matrisi vb.) genellikle ısı genleşme veya büzülme göstermeyecek kadar düşük düzeyde etkilenir. Sonuç olarak, malzemenin ultrasonik dalgalara karşı tepkisi aynı kalır (Abbaszadeh ve Güneş, 2018). Betondaki ultrases hızını etkileyebilecek sıcaklık değişimlerinin önemli faktörlerinden biri de malzemenin nem içeriğidir. Ancak, 10 °C-30 °C aralığında nem içeriğinde büyük değişimler olmadıkça, nemin ultrases hızına etkisi sınırlı olacaktır. Daha yüksek sıcaklıklarda, buharlaşma gibi süreçler nedeniyle nem kaybı artabilir ve betonun içindeki boşlukların sayısı artabilir, bu da ultrases hızını etkileyebilir. Sonuç olarak, 10 °C-30 °C sıcaklık aralığı, ultrases hızı üzerinde genellikle göz ardı edilebilir bir etkiye sahiptir. Dayanımda veya malzemenin elastik özelliklerinde

değişiklik olmadığı sürece, ultrases hızında önemli bir fark beklenmez (Abbaszadeh ve Güneş, 2018).

Abdullah ve Aydın tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada betonun elastisite modülü, UPV metodu kullanılarak araştırılmıştır. Mikro saniye düzeyinde ultrases dalgasının, malzemenin içinden geçiş süresi ultrases zaman ölçüm cihazı (55 kHz'lik iki transdüserli Passo olarak bilinen zaman ölçüm cihazı) ile yapılmıştır. Daha sonra aynı numuneler için basınç deneyleri yapılmıştır. Deneysel elastisite modülleri basınç testinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafiğinin doğrusal kısmının eğiminden elde edilmiştir. UPV metoduyla elde edilen hız ile deneysel elastisite modülü değerleri arasında regresyon analizi yapılarak beton elastisite modülünü UPV değerine bağlı olarak tahmin edebilen denklemler elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen en iyi model literatürde mevcut modellerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada, farklı araştırmacıların deneysel verileri de kullanılmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada önerilen modellerin, diğer modellerle karşılaştırıldığında iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. (Abdullah ve Aydın, 2016).

Alavi ve arkadaşları tarafından 2024 yılında yapılan çalışmada ultrasonik dalga hızı okumalarını ve geri tepme sayısını birleştiren SonReb yönteminin, tek test yöntemlerine göre daha yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Önceki çalışmalar, hem UPV hem de RN testlerinin sonuçlarını etkileyen birçok faktörün olduğunu göstermektedir. Bu da betonun basınç dayanımını her iki yöntemi de tek başına kullanarak değerlendirmeyi zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, tek NDT ölçümleri (UPV veya RN) beton basınç dayanımını doğru bir şekilde tahmin etmek için güvenilir bir şekilde kullanılamaz. Bu zorluk, daha tutarlı sonuçlara yol açan belirli etki parametrelerine duyarlılığı azaltmak için her iki test yönteminden elde edilen sonuçları birleştiren SonReb yönteminin geliştirilmesine yol açan araştırma çabalarını motive etmiştir. SonReb yönteminde, UPV ve RN testleri beton yapı üzerinde aynı konumda gerçekleştirilir. Her iki NDT yönteminin sonuçları, deneysel verilerin regresyon analizi yoluyla geliştirilen çeşitli önerilen denklemlerden birini kullanarak beton dayanımını değerlendirmek için eşzamanlı olarak kullanılır (Alavi ve ark., 2024).

Na ve arkadaşları, birleşik NDT kullanarak beton dayanımını tahmin etmek için makine öğrenimini uygulamaya yönelik ilk araştırmayı gerçekleştirmiştir. Yerinde koşulların ve girdi parametreleri olarak iki NDT'nin (UPV ve RN) sonuçlarının tahmin edilen sonuçlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. En iyi performans gösteren model, UPV ve RN ölçümlerinin yanı sıra su/çimento oranı, kütleme koşulu ve kum/agrega oranı gibi on iki

ek parametreyi içeren on dört girdiye sahip olmuştur. Modellerinin doğruluğu oldukça yüksek olmasına rağmen (% 10,99 ortalama mutlak yüzde hata veya MAPE), pratikte mevcut yapıların beton karışım tasarımının birçok detayı bilinmemektedir ve bu da modellerinin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır (Alavi ve ark., 2024).

Na ve arkadaşlarının çalışmasını takiben, diğer bazı araştırmacılar beton basınç dayanımını tahmin etmek için daha az girdi parametresi kullanarak ML (Makine öğrenimi) modelleri geliştirmiştir. Shih ve arkadaşları iki parametrelili bir model (UPV ve RN) geliştirirken, Kumar ve Kumar beton dayanımını tahmin etmek için kübik numunelerin ağırlığını üçüncü bir girdi olarak değerlendirmiştir. Sai ve Singh, üç test yönteminin sonuçlarına dayanarak beton dayanımını tahmin etmek için ML tekniğini uygulamıştır (RN, UPV ve Windsor Penetrasyonu (yarı tahribatlı bir test olarak kabul edilir)). Asteris ve Mokos, mevcut yapılardaki betonun basınç dayanımını tahmin etmek için yapay sinir ağlarının (YSA) uygulanmasını araştırmıştır ve hem UPV hem de RN'yi girdi olarak dahil etmenin, tek girdi modellerinden (UPV veya RN) daha iyi tahminler verdiğini göstermiştir. Poorarbabi ve arkadaşları UPV, RN ve yüzey elektrik özdirenci (SR) kullanarak betonun dayanımını tahmin etmek için YSA ve RSM (Tepki Yüzeyi Metodolojisi) kullanımını karşılaştırmıştır. Du ve arkadaşları, RN ve UPV testlerinin sonuçlarına dayanarak yüksek performanslı kendiliğinden yerleşen betonun (SCC) dayanımını tahmin etmek için ML kullanmıştır. Bonagura ve Noble, SonReb ile beton basınç dayanımını tahmin etmek için YSA yönteminin performansını ve doğruluğunu değerlendirmiştir ve regresyon modellerine göre önemli bir gelişme olduğunu bildirmiştir. Ngo ve arkadaşları, 98 veri noktası kullanarak üç farklı algoritmaya dayalı çeşitli modeller oluşturarak beton basınç dayanımını tahmin etmek için yerinde NDT'yi iyileştirmek için farklı makine öğrenimi yöntemleri uygulamıştır. Shishegaran ve arkadaşları, UPV ve RN kullanarak beton dayanım tahmini için hibrit ML modelleri oluşturmak üzere Yüksek İlişkili Değişkenler Oluşturma Makinesi (HCVCM) tekniğini kullanmıştır. Asteris ve arkadaşları, NDT sonuçlarını (UPV ve RN) kullanarak beton dayanımını tahmin etmek için yumuşak hesaplama tekniklerini kullanmıştır. Almasaeid ve arkadaşları, iki NDT girdisi (UPV ve RN) kullanarak jeopolimer betonun basınç dayanımını tahmin etmek için ML kullanmıştır (Alavi ve ark., 2024).

Literatürde yapılan çalışmalar, NDT tabanlı beton dayanım tahminlerinin doğruluğunu artırmak için makine öğrenimi kullanımında umut verici sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte, ML modellerini pratikte kullanmak için çeşitli sınırlamalar ve araştırma

boşlukları ele alınmaya devam etmektedir. İlk olarak, önceki modellerin neredeyse tamamı aynı veri kümelerine göre eğitilmiş ve test edilmiştir. Başka bir deyişle, tek bir veri tabanı oluşturulmuştur ve ardından verilerin % 70-% 93'ü rastgele eğitim veri kümesi olarak kullanılmıştır ve aynı veri tabanından kalan veriler test veri kümesi olarak seçilmiştir. Bu modellerin hiçbiri, modelin performansını objektif olarak değerlendirmek için bağımsız verilerle değerlendirilmemiştir. İkinci olarak, veri kümelerinin çoğu nispeten az sayıda veri içermektedir. Üçüncüsü, eğitim verilerinin sayısı ne olursa olsun, verilerin aralığı da önemlidir. Betonun mekanik özellikleri her bir RC yapısı içinde benzersiz bir şekilde değişmektedir. Betonun mekanik özelliklerini etkileyen faktörler (çimento türü, agrega türü, yaş vb.) beton basınç dayanımı ile hem UPV hem de RN arasındaki ilişkiyi de etkilemektedir (Alavi ve ark., 2024).

Alavi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmanın sonuçlarına göre, ML modelleri, NDT verilerinin etkin kullanımı yoluyla gelecekte yaygın uygulamalar için sağlam betonun karot testi ihtiyacını önemli ölçüde azaltma veya ortadan kaldırma potansiyeline sahiptir. Ancak, mevcut modelin tüm beton türlerine uygulanabilir olmadığını belirtmek önemlidir. Kapsamlı, pratik ve doğru bir model için ek eğitim verileri gereklidir (Alavi ve ark., 2024).

Alver'in 2013 yılında gerçekleştirdiği Tübitak projesinde projenin en önemli hedefi ve katkısının, bugün dünyada birçok insanın çeşitli şekillerde kullandıkları betonarme yapıların güvenli bir şekilde kullanılabilirlikleri hakkında bilgi sahibi olunabilmesi, görülemeyen hasarlar yüzünden durabilitesini ve taşıyıcılığını kaybeden yapıların önceden bu hasarlarının tahmin edilmesiyle yıkılmalarının engellenmesi ve dolayısıyla ekonomik kayıpların azaltılmasında etkili olması vurgulanmıştır (Alver, 2013).

Alwash ve arkadaşlarının 2015 yılında yaptığı çalışmada geri tepme çekici (RH) ve ultrasonik dalga hızı (UPV) gibi tahribatsız tekniklerin (NDT), beton dayanımını değerlendirmek için mevcut binalarda tahribatlı tekniklerle (karot testleri) birlikte yaygın olarak kullanıldığı belirtilmiştir. Dayanım değerlendirmesinin kalitesini artırmak için bir metodoloji geliştirilmiştir. Beton dayanımının daha iyi tahmin edilebilmesi için ultrasonik dalga hızı ve geri tepme çekici yöntemlerinin sıklıkla birleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu iki tekniğin birlikte kullanılmasının çok uygun olacağı belirtilmiştir (Alwash ve ark., 2015).

Asan ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışmada NDT yöntemlerinin öneminin, daha az zaman gerektirmeleri ve bir test için harcanması gereken maliyet nedeniyle son yıllarda arttığı vurgulanmıştır. Bu çalışmada, hem düşük dayanımlı hem de orta dayanımlı betonda tahribatsız yöntemler uygulanmıştır ve laboratuvar da ölçülen basınç dayanımı ile ilgili korelasyonları sağlanmıştır. RH ve UPV değerlerini eş zamanlı olarak basınç dayanımına karşı kullanan kombine SonReb yöntemi korelasyonu da her bir düşük ve orta dayanımlı beton için sağlanmıştır ve bu yöntemin etkisini r-kare değerlerinde kayda değer bir artışla göstermiştir (Asan ve ark., 2018).

Aydın ve Sarıbyık'ın 2007 yılında gerçekleştirdiği çalışmada Schmidt çekici ve ultrases test metodlarının karşılaştırılması sonucunda, Schmidt yönteminin daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bunun nedeni, Schmidt çekici sonuçlarını etkileyen faktörlerin, ultrases ölçümlerinde etkili olan faktörlere kıyasla daha az etkili olmasıdır. Ultrases testlerinde beton içindeki nem oranı ve ölçüm sırasında problemlerin küçük titreşimleri, sonuçlar üzerinde yanıltıcı etkilere neden olabilir. Bu durum, ultrases geçiş hızlarının ölçümünde daha fazla belirsizlik yaratabilir. Schmidt çekici, genellikle beton yüzeyinin sertliğine dayalı ölçümler yaptığı için, bu tür çevresel ve teknik faktörlerden daha az etkilenir. Bu nedenle, Schmidt yöntemi genellikle daha tutarlı sonuçlar sağlar (Aydın ve Sarıbyık, 2007). Bu tür bir çalışma, farklı ultrases geçiş yöntemlerinin beton basınç dayanımı üzerindeki etkilerini ve doğruluğunu karşılaştırarak, en uygun test yöntemini seçmeye yardımcı olmuştur. Özetle, dolaylı geçiş metodunun etkilerini daha iyi anlamak için yapılacak bir korelasyon çalışması, ultrases testlerinin uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini artırmıştır (Aydın ve Sarıbyık, 2007). Aydın ve Sarıbyık 2007 yılında gerçekleştirdiği çalışmada tahribatsız deney metodlarının her birinde belirli sınırlılıklar bulunabileceğini belirtmiştir. Bu sınırlılıkların, gerekli ön çalışmalar ve kalibrasyonlar yapılarak minimize edilebileceğini vurgulamıştır. Schmidt testi ve Ultrases hızı testi gibi tahribatsız yöntemlerin, beton basınç dayanımını belirlemede etkili olabileceğini belirtmiştir. Ancak bu yöntemlerin güvenilirliğini artırmak için beton elemanlarla önceden kalibre edilmesinin önemli olduğunu vurgulamıştır (Aydın ve Sarıbyık, 2007).

Aydın ve Sarıbyık'ın 2007 yılında yaptığı çalışmadaki bulgular yüksek beton dayanımının yapıların deprem güvenliğinde önemli bir faktör olduğunu ve tahribatsız testlerin bu tür değerlendirmelerdeki önemini ortaya koymaktadır (Aydın ve Sarıbyık, 2007). Deprem görmüş binaların beton kaliteleri karşılaştırıldığında yıkılan bina betonlarının % 64'ünün C16 değerinin altında olduğu sonucuna varılmıştır. C16 ve

üzerindeki beton sınıflarının oranı % 36 olmuştur. Ayakta kalan bina betonlarının % 21'i C16 değerinin altındadır. C16 ve üzerindeki beton sınıflarının oranı % 79'dur. Bu veriler, ayakta kalan binaların beton kalitelerinin, yıkılan binalardan belirgin şekilde daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. C16 ve üzeri beton sınıfının ayakta kalan binalarda % 79 oranında bulunması, bu binaların daha yüksek dayanım seviyesine sahip olduğunu ve dolayısıyla deprem sırasında daha iyi performans gösterdiğini işaret etmektedir. Yıkılan binalarda ise bu oran sadece % 36'dır. Bu da düşük beton dayanımının yıkılma olasılığını artıran bir etken olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, yüksek beton kalitesinin yapı güvenliğini önemli ölçüde artırabileceğini ve deprem performansını etkileyen kritik bir faktör olduğunu vurgulamıştır (Aydın ve Sarıbıyık, 2007). Elde edilen veriler, ayakta kalan binaların beton kalitelerinin büyük oranda yüksek olduğunu ve bu durumun beton dayanımının depremler karşısındaki önemini kanıtladığını göstermektedir. Depremler karşısında binaların yıkılma veya hasar görme nedenlerinin çeşitli etkenlere bağlı olduğu bilinmektedir. Ancak beton kalitesinin bu etkenler arasında son derece önemli bir rol oynadığı verilerle desteklenmiştir. Yüksek beton dayanımı, binaların deprem etkilerine karşı dirençli olmalarını sağlar ve bu da yapıların daha iyi performans göstermesine yardımcı olmaktadır. Beton kalitesinin yetersiz olduğu durumlarda ise, yapıların deprem sırasında ciddi hasar görme veya tamamen yıkılma riski artar. Bu bağlamda, beton kalitesinin artırılması ve tahribatsız testlerle düzenli olarak değerlendirilmesi, yapı güvenliğini ve deprem performansını iyileştirmek için kritik bir adımdır (Aydın ve Sarıbıyık, 2007).

Breccolotti ve Bonfigli'nin 2015 yılında yaptığı çalışmada geliştirilmiş SonReb yöntemi (I-SonReb) karbonatlı betonlar için önerilmiştir. Bu yöntem, ölçülecek ek bir parametre olan karbonatlı beton örtü kalınlığının bir fonksiyonu olarak ölçülen Geri Tepme indeksinin bir düzeltme katsayısının tanımlanmasına dayanmaktadır. Yöntemin kullanılabilirliği, doğrulukta iyileşmeyi göstererek doğrulanmıştır (Breccolotti ve Bonfigli, 2015).

Breccolotti ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışmada, geri tepme çekici testleri ve ultrasonik dalga hızı testlerinin okumaları üzerinde mekansal bir korelasyonun varlığı ilk olarak iki betonarme duvar üzerinde deneysel değerlendirmeler yoluyla araştırılmıştır. Bu korelasyonun etkisi daha sonra iyi bilinen SonReb yöntemi ile beton dayanım değerlendirmesine aktarılmıştır. SonReb standart prosedürü ile değerlendirmenin iyiliğini kontrol etmek için gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonları, incelenen yapı elemanları

için beklenen ortalama basınç dayanımlarının ihmal edilemeyecek mutlak hatalarının yanı sıra, ilgili bir eksik veya fazla tahmin olasılığını vurgulamıştır. Son olarak, somut mekansal korelasyonu dikkate almak ve SonReb değerlendirmesinin iyiliğini artırmak için standart prosedürde basit bir değişiklik önerilmiştir. Temel olarak münferit test okumalarının konumları arasındaki göreceli mesafeyi artırmaktan ibaret olan bu değişiklik, tutucu olmayan fazla tahmin hatasının kabaca % 15'ten % 5'e düşürülmesini sağlar (Breccolotti ve ark., 2018).

Breccolotti ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışmada SonReb yönteminin geliştirilmesi için geri tepme sayısı yöntemini ultrasonik yöntemle birleştiren dalga hızı yöntemi ön plana çıkmıştır. Bilindiği gibi, kombine yöntemin avantajı bir yöntemin bazı sınırlamalarının kısmen dengelenmiş olmasıdır. Örneğin, nemdeki bir artış ultrasonik dalga hızını artırır, ancak beton test çekici değerini azaltır (Breccolotti ve ark., 2018).

Rilem tarafından önerilen SonReb yöntemi denklemi (3) aşağıda sunulmuştur (Breccolotti ve ark., 2018);

$$f_c = 7.695 \cdot 10^{-11} \cdot UPV^{2.60} \cdot RN^{1.40} \quad (3.1)$$

Beton basınç dayanımı f_c her bir beton için tahmin edilmiştir. 3 ultrases testi ve 9 beton test çekici testi sonuçları ele alınmıştır (Breccolotti ve ark., 2018).

Breccolotti ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı çalışmada Monte Carlo simülasyonları, incelenen noktanın rastgeleliğini dikkate alarak SonReb tahminlerinin referans standartlara göre iyiliğini değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu simülasyonların sonuçları, incelenen yapı elemanı için beton basınç dayanımının değerlendirilmesinin, testlerin gerçekleştirildiği noktaya büyük ölçüde bağlı olduğunu ve mevcut uygulamada kullanılan (küçük) mesafelerde bireysel NDT okumalarının (hem UPV hem de RN) tekrarlanmasıyla hem eksik hem de aşırı tutucu olmayan hataların büyük olasılıkla elde edilebileceğini göstermektedir (Breccolotti ve ark., 2018).

Brencich ve arkadaşlarının 2020 yılında gerçekleştirdiği çalışmada tam olarak Schmidt beton test çekici kullanımının güvenilirliği üzerine odaklanılmıştır. Bu test yönteminin doğruluğu ve güvenilirliği uygun bir şekilde tartışılmıştır (Brencich ve ark., 2020).

Breysse ve Balayssac 2018 yılında yaptığı çalışmada mevcut yapılarda beton dayanımının etkili ve güvenilir bir şekilde değerlendirilmesi için tutarlı bir yaklaşım geliştirmenin nasıl mümkün olacağı üzerine odaklanılmıştır (Breysse ve Balayssac, 2018).

Chandak ve Kumavat tarafından 2020 yılında gerçekleştirilen çalışmada sadece RH ile elde edilen sonuçların dikkate alınmasının dayanım tahmini için yetersiz olduğu vurgulanmıştır. SonReb sonuçları, aynı kişi üzerinde yapılan herhangi bir bireysel testten daha doğru ve güvenilir görünmektedir. SonReb sonuçları beton performansının daha doğru bir şekilde değerlendirilmesine yardımcı olabilmektedir ve betonu takip etmek daha kolay olacaktır (Chandak ve Kumavat, 2020).

Chingalata ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada beton elemanların basınç dayanımının tahmininde kullanılan, matematiksel regresyon ilkelerine dayalı, en çok kullanılan ve güvenilir çok değişkenli denklemler sunulmuştur. Bu çalışmada analiz edilen matematiksel modellerin sadece iki değişkeni vardır (RH ve UPV testlerinin sonuçları). Bu vaka çalışması, ampirik modellerin uygulanmasıyla elde edilen tahmini basınç dayanımı sonuçlarını daha önce laboratuvar testleriyle elde edilen gerçek sonuçlarla karşılaştırarak seçilen matematiksel modellerin geçerliliğini ve tahmin doğruluğunu kontrol etmeyi amaçlamıştır. Her bir değer grubu için, tahmin edilen basınç dayanımları ilk olarak etkili olanlarla karşılaştırılmıştır ve ikinci olarak istatistiksel olarak yorumlanmıştır (Chingalata ve ark., 2017).

Craeye ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptığı çalışmada farklı tahribatsız teknikleri birleştirerek, etkili faktörleri azaltarak veya etkisiz hale getirerek elde edilen korelasyon eğrilerinin uyum kalitesini artırmanın mümkün olabileceği vurgulanmıştır. Ancak bu, dayanım tahmininin iyileştirileceğini garanti etmeyecektir (Craeye ve ark., 2017).

Cristofaro ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptığı çalışmada İtalya'nın Toskana Bölgesi'nde bulunan ve 50'li ve 80'li yıllar arasında inşa edilen mevcut betonarme binalar üzerinde gerçekleştirilen hem yıkıcı hem de yıkıcı olmayan testlerden oluşan önemli bir veri tabanının, istatistiksel analizler yapmak için kullanıldığı vurgulanmıştır. Çalışma, beton basınç dayanımını uygun bir güvenilirlikle tanımlamak için geniş bir yerinde test kampanyası yürütülmesi gerektiğini ayrıntılı olarak ortaya koymuştur. Sonuçlar, teknik literatürde bulunan formülasyonların kullanımının gerçek değerlerden farklı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Buna karşılık, tek bir binadan alınan silindirik numunelerin (karotlar) dayanımı ile kalibre edilen SonReb yönteminin sonuçları gerçek değerlere yakındır (Cristofaro ve ark., 2012).

Beton basınç dayanımının belirlenmesi için tahribatsız yöntemler kullanılabilir ve daha sonra tahribatsız yöntemler çok sayıda elemana kadar genişletilebilir. Tahribatsız

yöntemler beton karbonatlaşması, beton gözenekliliği, çatlakların varlığı gibi çok sayıda faktörden etkilenir. SonReb yöntemi, her yöntem için tipik olan sınırları ve belirsizlik paylarını telafi etmeyi sağlar. Teknik literatürde, SonReb sonuçlarını yerinde beton ile ilişkilendiren formülasyonlar mevcuttur (Cristofaro ve ark., 2012). Aşağıda bu formülasyonlardan üçü incelenmiştir: Giacchetti ve Lacquaniti (Denklem 4), Gašparik (Denklem 5) ve Di Leo ve Pascale (Denklem 6) (Cristofaro ve ark., 2012).

$$R_{cub}=7.695.10^{-11}.I_r^{1.4}.V_{us}^{2.6} \quad [MPa, m/s] \quad (3.2)$$

$$R_{cub}=0.0286.I_r^{1.246}.V_{us}^{1.85} \quad [MPa, km/s] \quad (3.3)$$

$$R_{cub}=1.2.10^9.I_r^{1.058}.V_{us}^{2.446} \quad [MPa, km/s] \quad (3.4)$$

Denklem (4)-Denklem (6)'da I_r Schmidt geri tepme çekici'nin ortalama değeri, V_{us} ise Ultrasonik dalga hızının ortalama değeridir. Bu denklemler, çoğu durumda gerçek dayanım değerlerini olduğundan fazla ya da az tahmin etmektedir. Bu nedenle, belirli ifadelerin uygun bir korelasyon eğrisi ile doğrulanması gerekmektedir. SonReb yöntemi söz konusu olduğunda, basınç dayanımı, rebound hammer indeksi ve ultrasonik hız arasındaki korelasyon yasası Denklem (7)'de gösterildiği şekilde ifade edilebilir (Cristofaro ve ark., 2012):

$$R_{cub}=a.I_r^b.V_{us}^c \quad [MPa, m/s] \quad (3.5)$$

Burada a ve b sabitlerinin değerleri en küçük kareler yöntemiyle çıkarılır (Cristofaro ve ark., 2012).

Cristofaro ve arkadaşlarının 2012 yılında yaptığı çalışmada beton basınç dayanımının değerlendirilmesinin, mevcut betonarme binaların en son sismik yönetmeliklere göre değerlendirilmesi için temel bir adım olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmada SonReb yönteminin, mevcut betonarme binalar üzerinde geniş bir veri tabanı kullanarak istatistiksel analizler yapmak için uygulandığı belirtilmiştir. Yapılan karşılaştırma, bilinen tahribatlı metodolojilerin (karotlar) tahribatsız bir yöntemle (SonReb) ilişkilendirilerek kullanılmasının, ilişkinin her bir bina için özel olarak kalibre edilmesi durumunda beton basınç dayanımının tahmininde daha yüksek düzeyde bilgi ve daha yüksek doğruluk elde edilmesine nasıl olanak sağladığını göstermektedir. Tek bir binadan çıkarılan silindir numunelerin (karotlar) dayanımı ile kalibre edilen SonReb yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar gerçek sonuçlara yakındır. Sonuç olarak, bu şekilde uygulanan SonReb yöntemi, binanın yerinde güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu da mevcut binalardaki beton dayanımını doğru bir şekilde karakterize

etmek için gereken tahribatlı testlerin sayısını sınırlandırmaya olanak tanır (Cristofaro ve ark., 2012).

Cristofaro ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptığı çalışmada onyedi formülüzasyon dikkate alınmıştır. Bu çalışma, kombine SonReb yönteminden yararlanarak mevcut betonarme binalarda betonun basınç dayanımını karakterize etme hususuyla ilgilenmiştir. Teknik literatürde mevcut olan en yaygın tahmin modellerinin güvenilirliğini kontrol etmek için geniş bir veri tabanı kullanılmıştır ve yeni yarı ampirik formülasyonlar geliştirilmiştir. Aynı zamanda regresyon yaklaşımı benimsenerek de önerilmiştir (Cristofaro ve ark., 2020). Ele alınacak deneysel veri örneği, hem dayanım değerleri hem de inşaat süreleri açısından birbirinden farklı beton türleriyle ilgili çok sayıda veriye dayandığı için istatistiksel açıdan büyük önem taşımaktadır. Gerçekten de veri tabanı, 263 binaya ait SonReb (I_r ve V_{us}) ve basınç testi (f_c) sonuçları da dahil olmak üzere 860 “üçlü” veriden oluşmaktadır. Veriler özellikle 14 MPa ile 34 MPa arasında değişen dayanımlara sahip ve ellili yıllar ile seksenli yıllar arasında Toskana'da inşa edilen binalara ait beton tipleriyle ilgilidir (Cristofaro ve ark., 2020). Teknik literatürde en yaygın olanlardan seçilen on yedi model, dikkate alınan veri tabanı temelinde kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yapı malzemesinin mekanik özelliklerini büyük ölçüde abartabildikleri için bazı formülasyonların her zaman güvenilir kabul edilmemesi gerektiğini göstermiştir (Cristofaro ve ark., 2020). Matematiksel yapıları bakımından birbirinden farklı beş farklı model (doğrusal, polinom, kuvvet, üstel ve logaritmik) varsayılan veri tabanı üzerinde regresyon analizi uygulanarak kalibre edilmiştir. Önerilen modeller, her bir modelin uygulanabilirlik koşullarını kontrol etmek için geniş bir I_r (15 ila 45) ve V_{us} (1000 m/s ila 4000 m/s) aralığında sağlanan beton dayanımının eğilimini kanıtlayarak tahminleri, dağılımları ve uygulama alanları açısından analiz edilmiştir (Cristofaro ve ark., 2020).

Önerilen modeller başka bir deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Bu makalede ilk kez yayınlanan verileri, çalışma kalibrasyon için kullanılan veri tabanına dahil edilmiştir. Özellikle 40 MPa'nın altında dayanıma sahip düşük ortalama aralıktaki numuneler için beton basınç dayanımına iyi ve güvenli bir yaklaşım sağlamışlardır. Önerilen modellerin çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. Bazı farklılıklar göstermesine rağmen varsayılan yapılarla ilgili olarak, kalibrasyonun tutarlılığı önerilen beş modelin hepsine iyi bir etkinlik sağlamıştır (Cristofaro ve ark., 2020).

Bu çalışma, SonReb testine dayalı tahmin yöntemlerinin benimsenmesine katkıda bulunmakta, yeni ve etkili formülasyonlar önermekte ve daha ileri doğrulama analizleri

için kullanılabilecek yayınlanmamış deneysel verileri göstermektedir (Cristofaro ve ark., 2020).

Lin ve arkadaşları betonun ultrasonik dalga hızını (UPV) tahmin etmek için agrega içeriği ve su-çimento oranı gibi iki parametre kullanarak bir geri yayımlı sinir ağı modeli geliştirmiştir. Duan ve arkadaşları, geri dönüştürülmüş agrega betonunun basınç dayanımını doğru bir şekilde tahmin etmek için yalnızca bir gizli katmana sahip bir sinir ağı modeli oluşturmuştur. Asteris ve arkadaşları katkı bazlı betonun basınç dayanımını tahmin etmek için 11 girdi parametresi ile bir NN modeli kurmuştur (Du ve ark., 2021).

Eddin ve arkadaşları tarafından 2022 yılında yapılan çalışmanın kapsamı, ultrasonik dalga hızı ve geri tepme çekiç sayısını ölçerek farklı su/çimento oranlarında harç basınç dayanımını değerlendirmek olmuştur (Eddin ve ark., 2022).

Frappa ve arkadaşlarının 2022 yılında yaptığı çalışma, yerinde beton dayanımını tahmin etmek için tahribatlı karot testi ve tahribatsız testlerin kapasitesini araştırmak için kolon numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel bir kampanyanın sonuçlarını sunmuştur. Ele alınan tahribatsız testler yüzey sertliği ve ultrasonik dalga hızı testleridir. Bu testlerin sonuçları kullanılarak SonReb yöntemi de uygulanmıştır. Bu araştırmanın özelliği, kolonlar üzerinde gerçekleştirilen tüm testlerin sonuçlarının, kolonların aynı betonuyla yapılan küp numunelerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasıdır. Tahribatsız tahmin yöntemleri, betonun farklı yaşlardaki kürü sırasında hem kolon hem de küp numuneler üzerinde gerçekleştirilirken, tahribatlı karot testi dökümden sonraki 28. günde kolon numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Farklı bina yönetmeliklerinin hükümleri kullanılarak belirlenen alınmış karotların dayanımı ile küp numunelerin dayanımı arasındaki karşılaştırma üzerine bir tartışma sağlanmıştır. Özellikle, en güvenli beton dayanımı tahminlerini sağlayan kod tanımlanmıştır (Frappa ve ark., 2022).

SonReb metodolojisi, Puglia'daki (İtalya) Gravina'da bulunan savaş sonrası bir bina üzerinde test edilmiştir: “Centrone” Tiyatrosu; karma bir yapı, yani betonarme ve yerel taştan inşa edilmiş taşıyıcı duvar kullanılarak inşa edilmiştir. Bina 90'lı yıllara kadar kullanılmış olup şu anda terk edilmiş durumdadır (Guida ve ark., 2011). Teşhis testleri yeterince yüksek ultrasonik hız ve homojen yüzey değerleri göstermiştir. Bu veriler, daha önce de belirtildiği gibi, sonuçların nitel yorumunu iyileştirmek için “SonReb” yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Analiz beton durumunun tatmin edici sonuçlarını göstermiştir (Guida ve ark., 2011). Yapılı mirasın yığma yapılarının analizi ve

nitelendirilmesi, bu yaklaşımın her bir binadaki patolojik olayları sınıflandırmak ve bir restorasyon müdahalesinin dayanıklılığını artırmak için yenilikçi çözümler uygulamak için nasıl yararlı olduğunu göstermektedir (Guida ve ark., 2011).

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Güneş'in gerçekleştirdiği Tübitak projesinde tahribatsız testlerin önemi açık bir şekilde vurgulanmıştır. Projede sayıları artabilecek dezavantajları hafifletmek amacıyla karot yöntemine ek olarak hasarsız (tahribatsız) yöntemlerin de kullanılmasının uzun zaman önce benimsendiği vurgulanmıştır. Projede malzemenin özelliklerinin dolaylı ölçümlerle hasarsız olarak belirlenmesi olarak tanımlanabilecek hasarsız inceleme tahribatsız muayene yöntemlerinin değişik karakteristiklerinin temel alınarak çeşitli sınıflara ayrılabilmesi de belirtilmiştir. Projede temas gerektiren (temaslı) veya gerektirmeyen (temassız, uzaktan) yöntemlerin, enerji tahriki içeren (aktif) veya içermeyen (pasif) yöntemlerin veya kullandıkları enerji türünü de dikkate alarak mekanik, akustik (gerilme dalgası, elastik dalga), elektromanyetik, kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerin bu sınıflandırmalara örnek olarak verilebileceği vurgulanmıştır. Betonun basınç dayanımının tayini amaçlı olarak sıkça kullanılan yöntemlerin genellikle mekanik ve ultrases hızı ölçümünü içeren akustik yöntemler olduğu da belirtilmiştir. TS EN 13791 standardında karot deneylerine ek olarak dikkate alınan yöntemlerin beton tabancası yöntemi, ultrases hızı yöntemi ve çekip çıkarma yükünün tayini yöntemi olması gerektiği de ayrıca vurgulanmıştır. Ayrıca projede bu yöntemlere ek olarak iki yöntemin daha uygulanması öngörülmüştür. Öngörülen yöntemler batma direnci (Windsor Probe) yöntemi ve delme direnci yöntemidir (Güneş, 2019). Projede belirtildiği üzere mevcut ulusal kaynaklı yayınlar tarandığında NDT yöntemlerinin beton dayanımının tespitinde kullanılmasını içeren yayınların genellikle bir ya da iki NDT yönteminin basınç deneylerinden elde edilen dayanım değerleriyle korelasyonunu içeren çalışmalar olduğu görülmektedir. En yaygın olarak kullanılan NDT yöntemlerinin geri sıçrama değeri (Schmidt çekici) ve ultrases hızı (UPV) tayini yöntemleri olduğu belirtilmiştir. Deneye tabi tutulan numune dayanımlarının sınırlı bir aralıkta kalması mevcut çalışmaların bir diğer sınırlamasını oluşturmaktadır. Taranan çalışmalar arasında içerik olarak bu projede yapılan çalışmalara en yakın olanının Arıöz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalar olduğu belirtilmiştir. Arıöz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarda en büyük agrega çapları için (10, 15, 22 ve 30 mm) beton (Schmidt) çekici, ultrases hızı (UPV), çekip çıkarma ve olgunluk faktörü deneylerinin yapıldığı vurgulanmıştır (Güneş, 2019). Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Güneş'in gerçekleştirdiği Tübitak

projesinde ise yapılan deneylerin hem dayanım aralığı hem de yöntem çeşidi olarak literatürdeki mevcut çalışmalara göre oldukça kapsamlı olduğu görülmektedir (Güneş, 2019). Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Güneş tarafından gerçekleştirilen Tübitak projesinde aşağıda yer alan önemli hususlar belirtilmiştir;

- Literatürde karşılaşılan çalışmalar arasında bu projede kapsamında yapılan çalışmalara katkı potansiyeli açısından kayda değer bulunan bir çalışma Selçuk ve arkadaşları (2012) tarafından geliştirilen çivi batma direnci yöntemidir. Batma direnci (Windsor Probe) yöntemi ile aynı prensibe sahip bu yöntem kapsamında havalı beton çivi tabancası ile betona çivi çakılmakta ve batma derinliği beton dayanımı ile ilişkilendirilmektedir (Güneş, 2019). Bu modelin diğer hasarsız yöntemlerle kombine kullanımını içeren modeller de geliştirmek mümkündür.
- Proje ekibi tarafından laboratuvarında ön denemeleri yapılan bu yöntemin Windsor Probe yöntemine göre önemli avantajları tespit edilmiştir. Bunlardan en önemlisi barutlu bir tabanca yerine havalı tabanca kullanımı içermesidir. Bunun yanı sıra cihazın göreceli olarak daha ucuz olması ve prob olarak çivi kullanılması çok önemli ekonomik avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, kullanılan hava tabancasının basınç seviyesinin ayarlanamıyor olması ve tabancanın esas itibarıyla çivileri betona tamamen çakacak seviyede tasarlanmış olması özellikle düşük dayanımlı betonlar için çivi batma derinliğinin çivi boyuna eşit olması nedeniyle bir dezavantaj teşkil etmektedir (Güneş, 2019).
- Özet olarak, NDT yöntemlerinin mevcut binaların durum değerlendirmesinde ve beton dayanımının tahmininde kullanılması konularında değerli çalışmalar mevcut olmakla birlikte yapılan çalışmaların içerik olarak sınırlı, sayı olarak oldukça yetersiz ve kolektif olarak bir bütünlük ve tamamlayıcılıktan yoksun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu alana potansiyel araştırmacıların özendirilmesi, araştırmacılar arasında iş birliği ve koordinasyon oluşturulması ve bütüncül bir araştırma stratejisi çerçevesinde uluslararası iş birliği geliştirilmesi bir gereklilik arz etmektedir. Bu açıdan ülkemizde NDT alanında etkinlik gösteren araştırmacıların bir araya gelmesini ve koordine olarak uluslararası araştırmalara dahil olmalarını öngören etkinlik organizasyonlarının gerekliliğine olan inanç güçlenmiştir (Güneş, 2019).

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Güneş tarafından gerçekleştirilen Tübitak projesinde ultrases hızı deneyleri ile ilgili önemli hususlar aşağıda sunulmuştur (Güneş, 2019);

- Yapılarda taşıyıcı elemanlarda doğrudan ultrases geçiş hızı belirlemenin pek mümkün olmadığını belirtmekte fayda görülmektedir (Güneş, 2019).
- Yarı-doğrudan ultrases geçiş deneyleri doğrudan deneylere göre daha düşük korelasyon katsayıları vermiştir. Buna karşın bu yöntemin doğrudan deneylere oranla uygulanabilirliği daha fazladır. Zira kolon kenarlarında yarı-doğrudan geçiş hızı deneyleri yapmak mümkündür ve elde edilen korelasyon katsayıları hala yüksektir. Dolayısıyla ultrases geçiş hızı yöntemleri arasında uygulanabilirliği en yüksek olan yöntem yarı-doğrudan iletim yöntemidir (Güneş, 2019).
- Doğrudan olmayan ultrases geçiş hızı deneyleri doğrudan ve yarı doğrudan deneylere oranla oldukça düşük korelasyon katsayıları vermiştir. Bunun nedeni ölçümün aynı yüzde yapılması ve özellikle düşük dayanımlı betonlarda sinyal kalitesinin çok düşük olmasıdır. Çok düşük dayanımlı betonlarda ölçüm yapmak mümkün olmamıştır. En pratik ve en uygulanabilir yöntem olmakla birlikte korelasyon katsayılarının düşüklüğü bu yöntemin en büyük dezavantajını oluşturmaktadır (Güneş, 2019).

Dr. Öğr. Üyesi Oğuz Güneş tarafından gerçekleştirilen Tübitak projesi literatüre önemli bir katkı sağlamıştır. Tübitak projesinde özetlenen deneysel çalışma neticesinde yerinde beton dayanımının tahmini amacıyla hasarsız inceleme yöntemlerinin tekil ve kombine olarak kullanımı konusunda literatürde benzeri bulunmayan zengin ve kaliteli bir veri seti üretilmiş bulunmaktadır. Üretilen veri, bu alandaki ulusal ve uluslararası araştırma çalışmalarına altlık teşkil edebilecek niteliktedir. Yerleşik hasarsız inceleme yöntemlerinin tekil kullanımı için beton dayanımı ile yapılan korelasyon çalışmalarından oldukça yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Bütün deneylerin aynı numune setleri üzerinde yapılmış olması dolayısıyla bu deney seti ile üretilen veriler hem bu projede yapılan çalışmalar hem de bu alanda araştırma yapanlar için oldukça değerli bir kaynak çalışma teşkil edecektir (Güneş, 2019). Tübitak projesi ile üretilen korelasyon bağıntılarının ülkemizdeki tahribatsız test uygulamaları açısından en fayda getirecek yönü, sıkça karşılaşılan düşük beton dayanımına sahip binaların durum tespitinde mevcut Avrupa standartlarının geçerli olmadığı korelasyon bağıntılarına alternatif olarak, çok düşüktür normal dayanıma kadar betonlarda kullanılabilir korelasyon bağıntılarının geliştirilmiş olmasıdır. Tübitak projesinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla belirlenen ve projede sunulan korelasyon bağıntılarının, ilgili standartların ulusal ekinde

kullanılabilir düzeyde olduğu özellikle vurgulanmıştır (Güneş, 2019). Tübitak projesinde az hasarlı diğer bir mekanik yöntem olan batma direnci yönteminin kabul edilebilir düzeyde korelasyon katsayıları verdiği ve oldukça hızlı olarak gerçekleştirilebildiği vurgulanmıştır (Güneş, 2019). Tübitak projesinde her biri belirli derecede yüksek korelasyon katsayısına sahip hasarsız yöntemler arasından birden fazlasının karot deneyleriyle kombine kullanılması durumunda korelasyon katsayılarında ve dolayısıyla deney sonuçlarının güvenilirliğinde her zaman bir artış kaydetmek mümkün olmamakla birlikte, özellikle farklı prensiplerle çalışan hasarsız yöntemlerin kombine kullanımının, alınan sonuçların mantıklı ve kabul edilebilir olup olmadığını belirlemekte oldukça fayda sağladığı belirtilmiştir (Güneş, 2019). Tübitak projesinde özellikle korelasyon katsayısı yüksek hasarsız ve az hasarlı yöntemlerin kombine kullanımı durumunda, önceden geniş bir saha veri setiyle korelasyonlar kurulmuş ve kalibrasyonlar yapılmış olmak kaydıyla, karot deneylerini azaltmanın veya elimine etmenin mümkün görüldüğü vurgulanmıştır. Buradaki en önemli etken kombine kullanım için kullanılacak grafikteki olası dayanım aralığını gösterir sınırların genişliği ve tahmini yapılacak beton dayanımının kullanım amacına bağlı olarak ne tür bir doğruluk derecesi içermesi gerektiğinin bilinmesidir (Güneş, 2019). Tübitak projesinde binadaki mevcut beton dayanımının belirlenmesi amacıyla her katta belirli sayıda karot numune alma zorunluluğunun gereksiz bir koşul olduğu belirtilmiştir. İstatistiksel hata analizleri sonucunda genel olarak ilk üç kattan alınacak sınırlı sayıda karot numunesi ile binanın kalanında hasarsız yöntemlerle durum tespit yapılmasına olanak verecek korelasyonların değerlendirmenin en uygun şekilde olmasına olanak sağlayacağı açıkça belirtilmiştir (Güneş, 2019). Özet olarak, hasarsız inceleme yöntemlerinin binalarda kombine kullanımı yoluyla yerinde beton dayanımı tahminin güvenilirliğinin arttırılabildiği, hasarsız yöntemlerden elde edilen verilerin kabul edilebilirliği konusunda önemli bilgiler sağladığı, yeterli çeşitlilik ve miktarda saha verisine dayalı korelasyonların bulunması durumunda kombine kullanılan hasarsız yöntemlerle karot almaksızın beton dayanımını belirli bir istatistiksel güvenlik sınırında tahmin etmenin mümkün olduğu görülmüştür. Tübitak projesinin en önemli ve kayda değer sonuçlarından birisi mevcut az hasarlı mekanik yöntemler arasından çekip çıkarma ve batma direnci yöntemlerinin diğer hasarsız yöntemlerle kombine kullanılarak halihazırda beton dayanımı tahmininin güvenilirliğini arttırması veya karot almaksızın yaklaşık dayanım tahmini yapmak için kullanılabilir olduğu da vurgulanmıştır (Güneş, 2019). Aynı zamanda Tübitak projesine saha çalışması yapılan binalardan her biri 15 katlı 4 tünel kalıp binanın her katından üçer adet karot numunesi alınmıştır. Karot numunelerin

ortalama basınç dayanımlarının yaklaşık 17 ile 28 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Beton basınç dayanımının katlar arasında oldukça geniş bir yelpazede değişkenlik gösterdiği de görülmüştür (Güneş, 2019).

Kara ve Erdal tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada tahribatsız test yöntemleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Tahribatsız test yöntemleri uygulanmasının endüstride güvenli malzeme kullanımının sağlanması açısından kritik bir rol oynadığı vurgulanmıştır (Kara ve Erdal, 2017).

Kim ve arkadaşları tarafından 2009 yılında gerçekleştirilen çalışma karbonatlaşmanın geri tepme sayısı ve betonun dayanım gelişimi üzerindeki etkisini üç dayanım seviyesi için açıklığa kavuşturmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, karbonatlaşmanın dayanım seviyesine bağlı etkisinin, dayanım azaltma katsayısı için mevcut denklemlerde bir hata kaynağı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu denklemler, yüzey karbonatlaşmasının etkisini telafi etmek için kullanılmaktadır (Kim ve ark., 2009).

Kondalkar ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada Nagpur'da bulunan eski yapı üzerinde yapısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Görsel inceleme de dahil olmak üzere tüm test sonuçlarını analiz ettikten sonra, yapının tüm statik yükler için güvenli ve kararlı hale getirilmesi için onarılması ve güçlendirilmesi gerektiği bulunmuştur (Kondalkar ve ark., 2021).

Birçok araştırmacı SonReb yönteminin uygulanmasıyla ilgili sonuçlarını sunmuştur. Cristofaro, mevcut tahmin modellerinin etkinliğini kontrol etmek ve 20. yüzyılın son on yıllarında yapılan İtalyan RC binalarının beton dayanımını tahmin etmek için çok etkili olan yeni ilişkiler önermek için geniş bir veri tabanı kullanmıştır. Diaferio, kurulum koşullarını ve dikkate alınan veri sayısını değiştirerek çok sayıda dönüşüm modelini kalibre etmek için kapsamlı bir deneysel kampanyadan yararlanmıştır. Mevcut bir yapıdaki beton dayanımının değerlendirme kalitesinin hassasiyetini artırmak için Ali-Benyahia tarafından başka bir metodoloji önerilmiştir. Analiz, karot sayısının artırılmasının, koşullu karot alma seçeneğinin ve tekli veya birleşik NDT yöntemlerinin kullanımının birleşik etkilerini ölçmüştür. Bununla birlikte, regresyon yöntemleri beton dayanımı tahminlerinde daha az doğruluk gösterdiğinden, yeni NDT parametreleri ve beton mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi yakalamak için Yapay Sinir Ağı (YSA) gibi teknikler kullanılmıştır. Bonagura ve diğerlerinin çalışmasından elde edilen sonuçlar, bir

tahmin cihazının mükemmel tahmin potansiyeline işaret etmektedir (Kouddane ve ark., 2022).

Bu çalışma, beton dayanımının değerlendirilmesi için SonReb kullanan NDT tekniklerinin kombinasyonunun bir incelemesini sunmaktadır. İlk olarak, yöntem açıklanmıştır ve literatürdeki farklı kalibrasyon yaklaşımları sunulmuştur. Ayrıca, değerlendirme altındaki beton için bir modelin tanımlanması veya kalibrasyonunun gerekliliği de göz önünde bulundurulmaktadır. Monte Carlo simülasyonu kullanılarak SonReb yönteminin analizi yapılmıştır. SonReb NDT birleştirme yönteminin kullanımına ilişkin çeşitli sonuçlar ve öneriler sunulmuştur (Kouddane ve ark., 2022).

Kumavat ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada betonun ortalama geri tepme indeksi ve basınç dayanımının zamana bağlı malzeme özellikleri olduğu vurgulanmıştır. Tek bir fonksiyonla doğrudan ilişkilendirilemeyeceği belirtilmiştir. Bu nedenle, ilişki, bağımsız değişkenlerin çimento türleri, kür koşulları, sıkıştırma yöntemleri, sıcaklık değişimi ve su-çimento oranı olduğu çoklu fonksiyonlara ihtiyaç duymaktadır. Araştırmacılar tarafından laboratuvar testlerinin sonuçlarından türetilen regresyon denklemlerinin yalnızca uygulama sınırları dahilinde kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu nedenle Schmidt geri tepme çekici ile dayanım tahmini beklenenden daha yüksek olabilmektedir. Varyasyon katsayısı ortalama basınç dayanımındaki artışla birlikte azalmıştır ancak ortalama geri tepme indeksinde böyle bir değişim gözlenmemiştir. Bu durum, etki eden faktörlerin varyasyon katsayısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu çalışma, mühendislerin beton dayanımını minimum hata ile tahmin etmelerini sağlayacak etkili matematiksel, doğrusal ve doğrusal olmayan ilişkiler sağlamıştır. Numunelerin yapımında farklı çimento türleri kullanıldığında elde edilen regresyon katsayısı sadece %65 olmuştur. Bu da çimento tiplerindeki değişimin geri tepme indeksine yansımadağını göstermektedir. Eğrilerin regresyon katsayısı, kürlenme ve sıkıştırma yöntemleri gibi faktörler söz konusu olduğunda da çok düşüktür. Değişken sıkıştırmalar geri tepme indeksini önemli ölçüde etkilemektedir ve aynı senaryo kürlenme yöntemleri için de geçerlidir. Aynı geri tepme sayısı değerleri için, farklı kür yöntemlerine sahip betonun basınç dayanımı, normal koşullar altında kürlenene betona göre %25-50 oranında azalmaktadır. Aynı yaşta su-çimento oranındaki bir değişiklik nedeniyle geri tepme indeksindeki değişim, geri tepme değerini önemli ölçüde artırmıştır. Sıcaklık değişimleri, betonların geri tepme indeksini ve basınç dayanımını da önemli ölçüde etkilemiştir. Sıcaklıktaki artış, numunelerin yüzey sertliğinin artmasına neden olarak geri tepme indeksinin belirsizleşmesine yol açmıştır. Geri tepme indeksine karşı

basınç dayanımı eğrilerindeki önemli sapma, çeşitli faktörlerin etkisini göstermektedir. Bu durum, bu faktörler dikkate alınmadan beton dayanımının tahmin edilmesinde geri tepme çekici kullanımının etkili olup olmadığı konusunda önemli bir soruyu gündeme getirmektedir. Geri tepme indeksini etkileyen farklı faktörleri göz önünde bulundurarak NDT test standartlarının geliştirilmesine/değiştirilmesine acil ihtiyaç vardır (Kumavat ve ark., 2021).

Minutolo ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı çalışmada, silindirik numunelerden (karot) elde edilen nicel sonuçları entegre etmek için kullanılan tahribatsız testler aracılığıyla betonun yerinde direnç tahmin yöntemlerine ilişkin bilgi birikimini artırmak amaçlanmıştır. Bir okul binasının beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel araştırmaların sonuçları gösterilmektedir. Daha sonra deneysel kampanya, mevcut bir binanın bir dizi beton kirişi ve kolonu üzerinde yürütülen bir vaka çalışması gibi sunulmuştur. Karotlar üzerindeki tahribatlı testler Campania Üniversitesi "Luigi Vanvitelli" Mühendislik Bölümü Sivil Yapılar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tahribatsız testlerin değerlerinin karot makineleri tarafından sağlanan değerlerle kalibrasyon prosedürü yoluyla elde edilen ifade, betonun basınç dayanımının ortalama değerlerinin tahmin edilmesine izin vermiştir. Bu sonucun, seçilen noktalardan çıkarılmaları ve tahribatsız testlerden elde edilen dirençlerle bir orantı bağlantısı olması koşuluyla, çok sınırlı sayıda karotla nasıl elde edildiği vurgulanmıştır (Minutolo ve ark., 2019).

Masi, ana tahribatsız testleri (sklerometrik yöntem, ultrasonik yöntem, kombine Sonreb yöntemi) tanımlamakta ve incelemektedir. Betonarme mevcut yapıların davranışını değerlendirmek için çözüm, DT araştırmaları ile elde edilen sonuçların tüm noktalarda genişletilmesine olanak tanıyan tahribatlı (DT) ve tahribatsız (NDT) yöntemlerin her ikisinin de kullanılmasıdır. NDT ve DT arasındaki en iyi korelasyonları belirlemek için yazar, sadece düşey yükler için tasarlanmış okul binalarından alınan bazı yapısal elemanlarla betonun özelliklerini araştırmaktadır. NDT ve DT sonuçları hem kiriş elemanları hem de kolon elemanları üzerinde analiz edilmiştir. Laboratuvarda gerçekleştirilen testlerin sonuçlarının analizi, aynı kattan alınan tüm yapısal elemanlar için ve tek bir yapısal eleman boyunca betonun mekanik özelliklerinde güçlü bir değişkenlik olduğunu göstermektedir (Minutolo ve ark., 2019).

Faella ve arkadaşları, Salerno Üniversitesi Yapısal Laboratuvarı'nda test edilmiş olan bir dizi beton kolon üzerinde, bunların birleşik yatay ve dikey yük altındaki döngüsel davranışlarını incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. Beton karotlar, hem

direncin uzamsal değişkenliğini hem de kolon yük geğmişinin etkisini incelemek için farklı yüksekliklerden çıkarılmıştır. Karotlardan beton dayanımını tahmin etmek için literatürde mevcut olan formülasyonlar değişken sonuçlar vermiştir ve tutarlı değildir. Birleşik Sonreb yönteminin uygulanmasının, tahribatsız testlerden elde edilebilecek direnç değerlerinin dağılımını azaltmada çok yararlı olduğu gösterilmiştir (Minutolo ve ark., 2019).

Concu ve Trulli, beton elemanların içindeki anormalliklerin tespitinde ultrasonik testin etkinliğini kontrol etmeyi amaçlayan deneysel bir testin sonuçlarını göstermektedir. Bu amaçla ultrasonik test, döküm sırasında kasıtlı olarak duvarın içine yerleştirilmiş farklı kusurlara sahip küçük bir beton duvar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu harita, farklı hız değerlerine sahip alanları vurgular ve özellikle düşük hıza sahip alanların görsel olarak tespit edilmesini sağlar. Şimdiye kadar elde edilen sonuçlar, hız haritalarının beton kusurlarının belirlenmesi için güçlü araçlar olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, iç kusurların yerini tespit etmek ve boyutlandırmak amacıyla beton elemanın iç kısmına ilişkin kapsamlı bilgi toplamak için öncelikle ultrasonik test verileri uygulanmalıdır (Minutolo ve ark., 2019).

Bu çalışma, silindirik numuneler (karot) üzerindeki tahribatlı testlerden elde edilen nicel sonuçlarla birlikte tahribatsız testler aracılığıyla yerinde beton direnci tahmin etme yöntemleri hakkındaki bilgileri artırmayı amaçlamaktadır. Aşağıda, betonun mekanik özelliklerini yerinde değerlendiren bazı teknikler analiz edilecektir. Daha sonra, bir okul binasının bir dizi beton kiriş ve kolonu üzerinde yürütölen deneysel bir kampanya vaka çalışması olarak sunulacaktır. Karotlar üzerindeki tahribatlı testler, Campania Üniversitesi "Luigi Vanvitelli" Mühendislik Bölümü Sivil Yapılar Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Betonun küp dayanımı, literatürde önerilen ampirik korelasyonlardan, sklerometrik testin geri tepme sayısının (I_r) ve ultrasonik dalgaların yayılma hızının (V) bir fonksiyonu olarak türetilmiştir. Önerilen korelasyon formölü, beton karot testlerinin sonuçları da dikkate alınarak yorumlanmıştır (Minutolo ve ark., 2019).

Bu çalışmada, bir okul binasının beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel araştırmaların sonuçları gösterilmiştir. Beton dayanımını tahmin etmek için kullanılan başlıca tahribatsız (yüzey geri tepme indeksi yöntemi, ultrasonik hız yöntemi, kombine Sonreb yöntemi) ve tahribatlı (karot alma) testler özetlenmiştir ve incelenmiştir. Tahribatlı yöntemler, DT, yerel olarak güvenilir sonuçlar sağlar, ancak sınırlı sayıda oldukları için çok temsil edici değildirler. Tahribatsız yöntemler, NDT, kesinlikle

güvenilir olmayan sonuçlar sağlar, ancak daha geniş dağılımları nedeniyle, beton özelliklerinin değişkenliğini yerinde daha iyi yeniden üretebilirler. Daha sonra, tahribatlı ve tahribatsız testlerin birleştirilmesiyle yerinde beton dayanımını tahmin etmek için bir prosedür vurgulanmıştır. Daha sonra, tahribatsız testlerin değerlerinin karot matkapları tarafından sağlananlarla kalibrasyon prosedürü yoluyla elde edilen ifade, betonun basınç dayanımının ortalama değerlerinin tahmin edilmesine izin vermiştir (Minutolo ve ark., 2019).

Nobile ve Bonagura 2016 yılında yaptığı çalışmada SonReb ölçümlerine dayanarak f_c 'yi tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan üç teknik olduğunu vurgulamıştır. Bu teknikler hesaplamalı modelleme, yapay zeka ve parametrik çok değişkenli regresyon modelleridir (Nobile ve Bonagura, 2016). Bu çalışmanın amacı, bazı güvenilir parametrik çok değişkenli regresyon modellerinin ve YSA yaklaşımının doğruluğunu, NDT ölçülen parametrelerine dayanan tahmini basınç dayanımını, bitişik konumlarda açılan karotlarda DT sonuçlarına dayanan etkili basınç dayanımı ile karşılaştırarak doğrulamaktır. Bu amaçla, birçok betonarme yapı üzerinde ilgili sayıda DT testi ve NDT testi gerçekleştirilmiştir (Nobile ve Bonagura, 2016).

Nobile ve Bonagura tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada beton basınç dayanımını tahmin etmek için SonReb ölçümlerini (UPV ve RN) kullanan bir dizi parametrik regresyon modeli geliştirilmiştir. SonReb kombine yöntemi, deneysel olarak elde edilen tahribatsız parametreleri aşağıdaki gibi korelasyonlarla birleştirerek beton basınç dayanımını değerlendirmiştir (Nobile ve Bonagura, 2016):

$$f_c = f_0 e^a V^b (RI)^c \quad (3.6)$$

burada:

f_c beton basınç dayanımıdır, [MPa];

f_0 birim dönüştürme faktörüdür, [genellikle $f_0 = 1 \text{ MPa s/m}$];

V ultrasonik dalga hızıdır [m/s];

RI geri tepme indeksidir;

a, b, c regresyon analizi ile belirlenecek boyutsuz korelasyon parametreleridir.

Çok sayıda yazar tarafından çeşitli korelasyon denklemleri geliştirilmiş ve sunulmuştur. Bu çalışmada, literatürde mevcut olan en güvenilir ve kullanılan formülasyonlardan bazıları ele alınmıştır (Nobile ve Bonagura, 2016):

$$f_c = 7.695 \cdot 10^{-11} \cdot (RI)^{1.4} \cdot (V)^{2.6} \quad (3.7)$$

$$f_c = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot (RI)^{1.058} \cdot (V)^{2.446} \quad (3.8)$$

$$f_c = 0.0286 \cdot (RI)^{1.246} \cdot (V)^{1.85} \quad (3.9)$$

Toskana Bölgesi Teknik Standartlarında önerilen bir diğer formülasyon, yukarıdaki üç formülasyonla hesaplanan ortalama değerdir. SonReb formülasyonlarının doğruluğunu değerlendirmek için, mevcut binada 16 farklı konumda tahmin edilen basınç dayanımı, bitişik konumlardan alınan numuneler üzerinde DT tarafından belirlenen etkili basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır (Nobile ve Bonagura, 2016).

Nobile ve Bonagura'nın 2016 yılında yaptığı çalışmada beton basınç dayanımının değerlendirilmesinde önerilen SonReb formülasyonlarının iyi bir öngörüye sahip olduğu gösterilmiştir (Nobile ve Bonagura, 2016).

Oroza ve Cuetara tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada 9 betonarme kolon üzerinde geri tepme çekici ve ultrasonik dalga hızı okumaları yoluyla basınç dayanımının tahmininde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Tahmin, farklı SonReb modelleri uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, yerli üretim Normal Portland Çimentoları P-35 (Tip I) ve Küba taş ocaklarından elde edilen agregalarla üretilen betonlar için, uygulanan modellerden hangisinin pres kırma deneyiyle elde edilen 27.0 MPa'lık basınç dayanımı değeriyle daha tutarlı olduğunu değerlendirmektir. Elde edilen sonuçlar, RILEM ve Tanigawa ve diğerleri tarafından önerilen modellerin % 4'ün altındaki yüzde farkıyla referans değere en yakın modeller olduğunu göstermiştir. Bu araştırma, Küba Havana Tarihi Merkezi'nin restorasyon süreçlerinde tahribatsız testlerin daha doğru sonuçlarla gerçekleştirilmesine olanak sağlayacaktır (Oroza ve Cuetara, 2022).

Oroza ve Cuetara'nın 2022 yılında yaptığı çalışmada Küba normal Portland Çimentosu P-35 (Tip 1) ve yerli agregalarla üretilen betonun basınç dayanımının tahmini için kullanılan farklı SonReb modellerinin uygulanmasından elde edilen sonuçlara dayanarak, RILEM ve Tanigawa ve diğerleri tarafından önerilen modellerin, her iki durumda da % 15'in altında bir varyasyon katsayısı için diğer modellere göre referans değere daha yakın sonuçlar sergilediği gösterilmiştir (Oroza ve Cuetara, 2022). İstatistiksel analiz, bu modeller için, kullanılan diğer modellere kıyasla, basınç dayanımı açısından geri tepme çekici ile ultrasonik dalga hızı arasında yüksek bir korelasyon ve benzer davranışlar olduğunu yansıtmıştır (Oroza ve Cuetara, 2022).

Oroza ve Ricardo tarafından 2023 yılında yapılan çalışmanın amacı, Küba çimentosu ve agregaları ile yapılan betonarme elemanlarda basınç dayanımını tahmin etmek için farklı SonReb modellerini değerlendirmek olmuştur. P-35 Normal Portland çimentosu karışımı ile tasarlanmış 9 kolonda geri tepme indeksi ve ultrasonik dalga hızı ölçümleri yapılmıştır. Sekiz model karşılaştırılmıştır ve bunlardan RILEM, Tanigawa ve diğerleri tarafından önerilenler, beton silindirlerin kırılmasıyla belirlenen referans değere göre % 4'ten daha az bir hata göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, ulusal malzemeler kullanılarak betonun basınç dayanımını tahmin etmek için modellerin kullanılmasının uygulanabilirliğini göstermektedir (Oroza ve Ricardo, 2023).

Oroza ve Ricardo tarafından 2023 yılında yapılan çalışmada Normal Küba Portland Çimentosu P-35 (Tip 1) ve yerli agregalarla üretilen betonun basınç dayanımının tahmini için incelenen farklı SonReb yöntemlerinin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlara dayanarak, RILEM ve Tanigawa ve arkadaşları tarafından önerilen modellerin, Schmidt geri tepme çekici ve ultrasonik dalga hızı testlerini ilişkilendirerek betonun f_c değerini % 4'ten daha az bir hata ile tahmin etmek için uygulanabileceği gösterilmiştir. Bu sonuçlar, yeni inşa edilen binalarda veya restorasyon çalışmalarında ulusal beton kalitesinin tahribatsız değerlendirmeleri için SonReb modellerinin kullanımını geçerli sayan Küba yönetmeliklerinin gelecekte geliştirilmesi için bir araştırma temeli olarak kullanılabilir (Oroza ve Ricardo, 2023).

Özdoğan ve Okuyucu tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen çalışmada beton Schmidt çekici kullanılarak doğal taşlardan imal edilen yığma duvarların basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin elde edilmesine yönelik bir yöntem geliştirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle tarihi bir yığma yapıdan doğal taş örnekleri alınarak taşların fiziksel ve mekanik özellikleri elde edilmiştir. Bu elde edilen değerler ile Schmidt sertlik ölçümleri ilişkilendirerek taşların sertlik değerlerinden basınç dayanımı ve elastisite modülü eldesine ilişkin çeşitli bağıntılar ortaya konmuştur. Daha sonra bu bağıntılar kullanılarak tarihi bir yığma yapı olan Erzurum Kadana Camii duvar basınç mukavemeti ve duvar elastisite modülleri elde edilmeye çalışılmıştır. SAP2000 yazılımı ve makro modelleme tekniği kullanılarak oluşturulan yapısal modele bu malzeme özellikleri tanımlanmış ve teorik modal analiz yapılarak; yapının mod şekilleri ve modal frekans değerleri hesaplanmıştır. Yapı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması yapılarak deneysel mod şekilleri ve modal frekanslar elde edilmiş, teorik değerlerle karşılaştırılarak üretilen bağıntıların geçerliliği araştırılmaya çalışılmıştır. Taş yığma duvarların mekanik özelliklerinin eldesine yönelik olarak bu çalışmada takip edilen

yöntemin geçerliliğinin farklı tarihi yığma yapılar üzerinde yapılacak uygulamalarla irdelenmesi önerilmiştir (Özdoğan ve Okuyucu, 2018).

Özhan ve Büyüktaş tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi bünyesinde bulunan tarımsal yapıların yapı elemanlarının mevcut dayanımlarının ve bu elemanlarda kullanılan donatı yapısının durumu tahribatsız yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için darbe enerjisi 225 kgxm olan N 34 tipi “beton test çekici (Schmidt çekici)” ve 40000 ölçüm kapasiteli ve 300 mm derinliğe kadar ölçüm yapabilme özelliğine sahip profometer 5 rebar locator marka “donatı tarama cihazı (röntgen cihazı=covermeter)” kullanılmıştır. Çalışmada Ziraat Fakültesi bünyesinde bulunan bitkisel üretim yapıları, hayvansal üretim yapıları ve diğer yapıların temel, kolon, kiriş, döşeme, duvar gibi yapı elemanlarının mevcut dayanımlarının belirlenmesi için beton test çekici kullanılarak okumalar yapılmış ve elde edilen okumalar TS EN 13791 Standardındaki Madde 9’a göre değerlendirilerek dayanım değerleri ve beton sınıfları belirlenmiştir. Daha sonra donatı tarama cihazı kullanılarak bu yapı elemanlarında kullanılan boyuna donatı çapı ve sayısı, enine donatı çapı ve aralığı ile pas payı kalınlıkları belirlenmiştir. Böylece her iki yöntemle göre elde edilen sonuçlar rapor haline getirilerek mevcut yapıların dayanım durumları ile ilgili çizelgeler ve grafikler oluşturulmuştur. Çalışma sonunda beton test çekici kullanılarak elde edilen sonuçlara göre yapı elemanlarındaki en düşük beton sınıfı 9.10 MPa ile C8 ve en yüksek beton sınıfı ise 35.62 MPa ile C40 olarak bulunmuştur. Yine bu yapı elemanlarında donatı tarama cihazı kullanılarak elde edilen sonuçlara göre donatı çapları Ø8 mm ile Ø24 (Ø16 mm ± 8 mm) arasında ve pas payları ise 3 mm ile 100 mm arasında bulunmuştur (Özhan ve Büyüktaş, 2018).

Rashid ve Waqas’ın 2017 yılında yaptığı çalışmada beton test çekici test yöntemi ve ultrases hızı test yöntemi tekniklerinin basınç dayanımını değerlendirmek için birleştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yöntem SonReb yöntemi olarak adlandırılmıştır. Örneğin, betonun nem içeriğindeki artış dalga hızını yükseltir, ancak geri tepme sayısını düşürür. Bazı araştırmacılar basınç dayanımını değerlendirmek için her iki tekniği birleştirmiştir, ancak birkaç parametre varsaymışlardır. Bu çalışmada basınç dayanımı ve NDT ile değerlendirilmiş ve her iki NDT de basınç dayanımını değerlendirmek için bir tahmin formülü önermek üzere birleştirilmiştir ve son olarak bu çalışmanın geniş deneysel gözlemleri ve önceki çalışmalarla doğrulanmıştır. Rilem, ISO dayanım eğrisi çizerek bir ölçek önermiştir, bu çalışmada, 50 MPa'ya kadar basınç

dayanımını tahmin etme yeteneğine sahip ISO-dayanım eğrileri de çizilmiştir (Rashid ve Waqas, 2017).

Rashid ve Waqas tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada basınç dayanımının değerlendirilmesinde tahribatsız tekniklerin güvenilirliğini değerlendirmek için bir deney tasarlanmıştır. Dokuz farklı karışım, 20 ila 50 MPa arasında değişen bir basınç dayanımı aralığı için tasarlanmıştır. Basınç dayanımını değerlendirmek için ultrasonik dalga hızı ve geri tepme sayısı kullanılmıştır ve son olarak tahribatlı tekniklerle elde edilen basınç dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır. Ultrasonik dalga hızı (UPV) ve geri tepme sayısı (RN) yaş artışıyla birlikte artmıştır ve NDT testinin her iki değeri de su/çimento oranının azaltılmasıyla artmıştır. Regresyon analizi yapılmıştır ve UPV ile basınç dayanımı ve RN ile basınç dayanımı arasında ilişkiler kurulmuştur. UPV ile basınç dayanımı karşılaştırıldığında, RN ile basınç dayanımı arasında yakın bir ilişki olduğu görülmüştür. Basınç dayanımını değerlendirmek için UPV ve RN'yi içeren bir tahmin formülü önerilmiştir ve deneysel ve tahmini basınç dayanımı değerleri arasında çok iyi bir uyum gözlenmiştir. Önceki çalışmalarla da doğrulanmıştır ve verilerin çoğu, özellikle basınç dayanımı aralığı 20 ila 50 MPa olduğunda, eşitlik çizgisinin $\pm\%15$ aralığında yer almaktadır. Basınç dayanımını 20 ila 50 MPa arasında tahmin edebilen ISO dayanım eğrileri çizilmiştir ve mevcut deneysel gözlemler ve geniş veri tabanı ile de doğrulanmıştır (Rashid ve Waqas, 2017).

Şan ve Ulusu tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada Erzincan' da sürekli depremlerin yaşanmış olması ve mevcut yapılarda bulunan betonun %99'unda Fırat agregası kullanılıyor olması nedeniyle Erzincan Fırat agregası kullanılarak üretilen betonların, beton test çekici geri sıçrama değeri R ile pres basınç değerleri f_{ck} arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda farklı Dmax ve granülometrelerde agregası kullanılarak uygulamada yaygın olarak kullanılan üç farklı (0,45; 0,50; 0,55) su/çimento (s/ç) oranlarında beton karışımları yapılmış, üretilen betonlardan alınan küp numuneler kirece doymun kür tankında bakıma tabi tutulduktan sonra 28 günün sonunda numuneler kür havuzundan çıkarılarak pres makinasında basınç deneyine tabi tutulmuştur. Basınç deneyi sırasında kırılma yüklerinin %40' ın üzerindeki bir yük altında, en az 10 adet geri sıçrama değeri okunmuştur. Beton test çekici değerini etkileyen en önemli faktörün agregası olduğu gözlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak geri sıçrama ile pres değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler çizilmiştir. Sıçrama değeri R'nin, Dmax ve s/ç oranına bağlı olarak değiştiği, Dmax' ın artmasıyla ve s/ç oranının azalmasıyla R sıçrama değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, tahribatsız olarak Fırat

agregası kullanılarak elde edilen betonların dayanımlarının %85' in üzerindeki bir doğruluk ile belirlenebileceği görülmüştür (Şan ve Ulusu, 2022).

Tanrikulu ve Turan tarafından 2010 yılında yapılan çalışmada farklı agrega granülometreleri (A16 ve B16) ve su/çimento (w/c) oranları (0,60, 0,65, 0,70, 0,75) ile hazırlanan beton numuneleri üzerinde çeşitli testler uygulanmıştır. Her bir w/c oranında ve yaşta (7, 28, 60, 90 gün) beton numuneleri oluşturulmuştur ve bu numuneler üzerinde ultrases hızı (UPV) ve Schmidt çekici testleri yapılarak basınç dayanımları ve yarma dayanımları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. İki farklı granülometri eğrisi (A16 ve B16) kullanılarak toplam 32 grup karışım hazırlanmıştır. Her bir grup 4 adet küp ve 7 adet silindir olmak üzere 11 adet numuneden oluşmuştur. Numuneler kür havuzunda bekletildikten sonra UPV ve test çekici ölçümleri yapılarak basınç dayanımı ve silindir yarma dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımları ile UPV arasında ve basınç dayanımları ile test çekici değerleri arasında regresyon analizleri yapılmıştır. Aynı şekilde silindir yarma dayanımları için de bu analizler gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı ve silindir yarma dayanımı ile UPV arasındaki ilişkinin, test çekici sonuçlarına göre daha doğrusal bir davranış sergilediği tespit edilmiştir. Gerçeğe daha yakın sonuçlar elde etmek için, hem UPV hem de test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılmasının daha doğru sonuçlar verdiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmanın sonunda, farklı w/c oranları ve beton yaşlarına göre elde edilen verilerle regresyon denklemleri oluşturulmuştur ve bu denklemler üzerinden tahminler yapılmıştır. Özellikle tahribatsız testlerin (UPV ve Schmidt çekici) birlikte kullanılması, sonuçların doğruluğunu artırdığı için betonun gerçek dayanımı hakkında daha iyi bir tahmin yapılmasına olanak sağlamıştır (Tanrikulu ve Turan, 2010).

Thapa ve arkadaşları tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada iri agrega olarak farklı oranlarda normal taş ve geri dönüştürülmüş tuğla kullanılan beton küplerde tahribatsız ve tahribatlı testler arasındaki ilişkiyi elde etmek için yapılmıştır. Geri dönüştürülmüş tuğla agregasının kullanımının yaygın olduğu yerlerde model tahminini daha verimli hale getirmek için beton sınıfı, yoğunluğu ve yaşındaki varyasyonlar dikkate alınmıştır. Normal beton M20, M25 ve M30 sınıfları, taşın geri dönüştürülmüş tuğla agregası ile değiştirilmesiyle yoğunluk varyasyonuna ve 7, 28 ve 84 günlük beton dayanımının test edilmesiyle yaşa sahip olarak kabul edilmiştir. Regresyon modeli yapay sinir ağları ve çoklu regresyon analizi kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışma, yapay sinir ağı kullanılarak geliştirilen regresyon modelinin daha iyi sonuçlar öngördüğünü göstermektedir. Deneyden elde edilen modeller, farklı yazarlar tarafından sağlanan diğer

modellerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca geri dönüştürülmüş tuğla agregası kullanımının tahribatsız testlere ve beton modülüne etkisi de ele alınmıştır (Thapa ve ark., 2021). Çalışmada betonun dayanımının tahmini için tek bir NDT yönteminin kullanılmasının, testle ilgili dezavantajlar nedeniyle verimli sonuçlar vermediği vurgulanmıştır. Bu NDT testleri, çeşitli beton ve çevresel parametrelerin etkisine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, farklı NDT testlerinin aynı anda kullanılması sonuçlardaki hataları azaltır (Thapa ve ark., 2021).

Tsioulou ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada farklı miktarlarda çelik lif içeren ultra yüksek performans lif takviyeli beton incelenmiştir. Ultrasonik dalga hızı ve geri tepme çekici ölçümlerinin yanı sıra basınç ve çekme testleri gerçekleştirilmiştir ve uygun ampirik tahribatsız modellerin geliştirilmesi incelenmiştir (Tsioulou ve ark., 2017).

Tsioulou ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada UHPC'nin (fiziksel özellikleri en üst seviyeye çıkarılan beton) basınç dayanımı ve elastisite modülünün değerlendirilmesi için NDT yöntemlerinin güvenilirliği araştırılmıştır. Ultrasonik dalga hızı (UPV), rebound hammer (RH) ve kombine SonReb teknikleri incelenmiştir ve mekanik testlerden elde edilen gerçek mekanik özellikler kullanılarak çeşitli modeller geliştirilmiştir ve değerlendirilmiştir. Ayrıca, teorik modellerin güvenilirliği UPV ölçümleri kullanılarak UHPC'nin Elastisite modülünün hesaplanması için homojen elastik ortam için değerlendirilmiştir (Tsioulou ve ark., 2017). Basınç dayanımının NDT değerleri ile korelasyonundan, basınç dayanımına karşı Q değerleri için hem doğrusal hem de üstel regresyon modelleri için yüksek belirleme katsayısı değerleri (0.94-0.98) bulunmuştur. UPV'nin basınç dayanımı ile dağılımından dayanım sonuçları, determinasyon katsayısı değerleri doğrusal regresyon modelleri için 0.90-0.97 aralığında bulunurken, üstel regresyon modelleri için ilgili değerler (0.99-1.00) önemli ölçüde daha yüksektir (Tsioulou ve ark., 2017). Q'ya karşı elastisite modülü değerleri ile ilgili olarak, ilgili sonuçlara kıyasla daha düşük regresyon değerleri bağlamında basınç dayanımı hem doğrusal hem de üstel modeller için hesaplanmıştır (doğrusal regresyon modelleri için 0,81-0,88 ve üstel modeller için 0,78-0,94). UPV'nin elastisite modülü ile korelasyonundan, doğrusal regresyon değerleri için 0.71-0.97 aralığında belirleme katsayıları hesaplanırken, üstel modeller için genel olarak daha yüksek değerler (0.82-0.95) elde edilmiştir (Tsioulou ve ark., 2017). Sunulan tüm modellerin değerlendirilmesinden basınç dayanımı, genel olarak en düşük hata değerleri birleşik hatalar için elde edilmiştir. SonReb ve incelenen tüm vakalarda %10'un altında hata elde

edilmiştir (Tsioulou ve ark., 2017). Elastisite modülü ile ilgili olarak, genel olarak SonReb yönteminin en doğru yöntem olduğu bulunmuştur. UHPC durumunda, %1,2'nin altında hata değerleri elde edilmiştir. UHPFRC-1 sonuçlarına göre, hata %5,7'yi aşmamıştır. UHPFRC-3 için ilgili maksimum hata değeri, 30 MPa'dan düşük Elastisite modülü değerleri için %8,6'ya eşit bulunurken, daha yüksek değerler için hata %1'i aşmamıştır (Tsioulou ve ark., 2017). Bu çalışmanın ana sonucu, incelenen tüm durumlarda %10'un altında hata elde edildiğinden, kombine SonReb yönteminin yüksek düzeyde doğruluk sunabileceğidir. Bu nedenle, SonReb yöntemi, UHPC ve UHPFRC'nin basınç dayanımı ve elastisite modülünün güvenilir bir şekilde tahmin edilmesi için şiddetle tavsiye edilmektedir (Tsioulou ve ark., 2017).

Yörübulut ve Doğan tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi 2008/001 numaralı projesi kapsamında, 117 adet karot numunesi için tahribatsız yöntemlerle elde edilen veriler kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon modelleri oluşturulmuştur ve bu iki modelden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tahribatsız deney verileri kullanılarak yapay sinir ağı ve regresyon yöntemleriyle tahmin edilen beton basınç dayanımları ile tahribatlı yöntem olan karot numunelerinin basınç dayanımlarının birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür ve yeni model ortaya konulmuştur. (Yörübulut ve Doğan, 2019).

Yüksel tarafından 2003 yılında yapılan çalışmanın amacı, uygulaması en kolay iki yıkıntısız test yönteminin bileşik olarak kullanılmasıyla oluşturulan SonReb yönteminin, betonun yerinde dayanımını yeterli bir doğrulukla tahmin edebilme potansiyelini özellikle pratik uygulamalar açısından göstermek olmuştur. Ayrıca, deneye tabi yapıdaki beton özelliklerini daha iyi yansıtan özel kalibrasyon eğrileri kullanılarak elde edilen hassasiyetin artırılmasına dikkat çekilmiştir. Bu doğrultuda, mevcut betonarme bir yapıda uygulama gerçekleştirilmiştir ve tahribatlı deney sonuçları, özel eş-dayanım eğrileri ile farklı araştırmacıların sunduğu bağıntı veya abaklarla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, SonReb yönteminin güvenilirliğini ve etkinliğini ortaya koymuştur ve yapıların yerinde dayanım tahmininde sağladığı katkıyı vurgulamıştır (Yüksel, 2003).



4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması bir analiz çalışması olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmalarında İlkon Mühendislik Firmasının farklı yapılarda farklı taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici ve ultrases hızı test verileri kullanılmıştır. İlkon Mühendislik Firmasının 10 adet farklı betonarme yapılarda taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici ve ultrases hızı test verilerinin uluslararası literatürde yer alan SonReb formülüzasyonlarındaki karşılığı ortaya konmuştur. Verilerin analizi sürecinde Excel programından yararlanılmıştır. Verilerin analizi kısmında Excel programında her farklı yapı için uluslararası literatürde yer alan SonReb formülüzasyonlarından elde edilen sonuçları içeren grafikler oluşturulmuştur. Ulusal ve uluslararası literatürde yapılarda farklı taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirilen beton test çekici testi ve ultrases hızı testi çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalarda farklı araştırmacılar tarafından farklı SonReb formülüzasyonları ortaya konmuştur. Bu tez kapsamındaki verilerin uluslararası literatürde yer alan bu formülüzasyonlardaki karşılığının belirlenmesi sonucunda yeni modeller de ortaya konmuştur. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan literatürde mevcut olan formüller Çizelge 4.1.'de sunulmuştur.

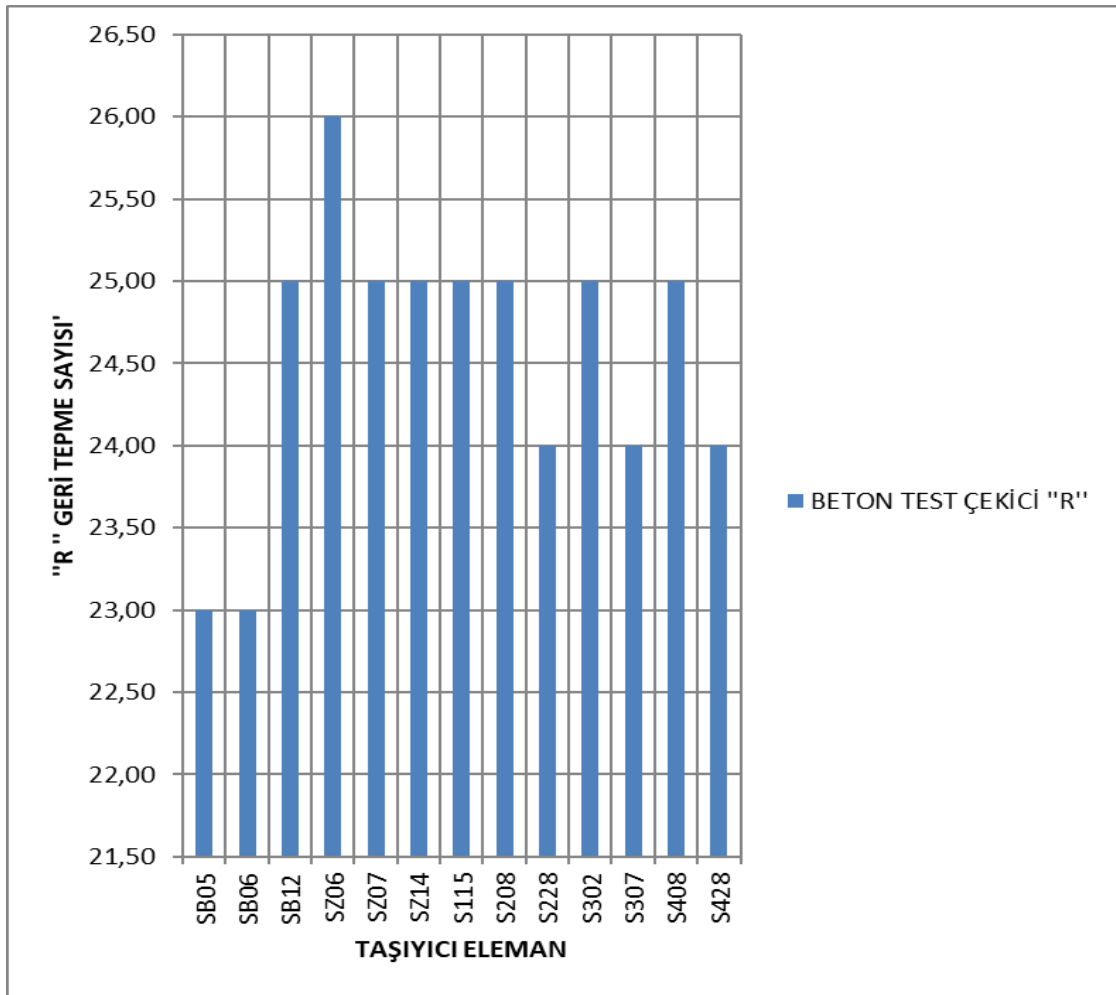
Çizelge 4.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan SonReb formülüzasyonları

MİNUTOLA	(2019)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (3,1 \times 10^{-5}) \times (V^{0,8516}) \times (R^{1,8468})$
Bellander	(1979)	(Mpa : km / s)	$R_{cub} = (0,00082 \times R^3) + (11,03 \times V) - 32,7$
Faella et al. (a)	(2009)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (2,6199 \times 10^{-8}) \times (R^{0,5341}) \times (V^{2,2878})$
Faella et al. (b)	(2009)	(Mpa : m/s)	$R_{cup} = (0,26551 \times R) + (0,01385 \times V) - (34,51583)$
Giacchetti and Lacquaniti	(1980)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (7,695 \times 10^{-11}) \times (V^{2,6}) \times (R^{1,4})$
Bocca and Cianfrone	(1983)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (2,765 \times 10^{-9}) \times (V^{2,487}) \times (R^{1,3114})$
Gasparik	(1992)	(Mpa : km/s)	$R_{cub} = (0,0286) \times (R^{1,246}) \times (V^{1,85})$
Rilem	(1993)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (9,27 \times 10^{-11}) \times (R^{1,4}) \times (V^{2,6})$
Di leo and Pascale	(1994)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (1,2 \times 10^{-9}) \times (V^{2,446}) \times (R^{1,058})$
Arioğlu and Köylüoğlu	(1996)	(Mpa : km/s)	$R_{cub} = (0,000153) \times (R^3 \times V^{4,0611})$
Kheder	(1999)	(Mpa : m/s)	$R_{cub} = (0,0158) \times (R^{1,1171}) \times (V^{0,4254})$
Caiaro et al.	(2003)	(Mpa:m/s)	$R_{cub} = (1,74 \times 10^{-7}) \times (R^{0,0674}) \times (V^{2,36})$
Del monte et al.	(2004)	(Mpa:m/s)	$R_{cub} = (4,40 \times 10^{-7}) \times (R^2 \times V^3)^{0,5634}$
Menditto et al.	(2004)	(Mpa: m/s)	$R_{cub} = (0,00004) \times (R^{1,88148}) \times (V^{0,80840})$



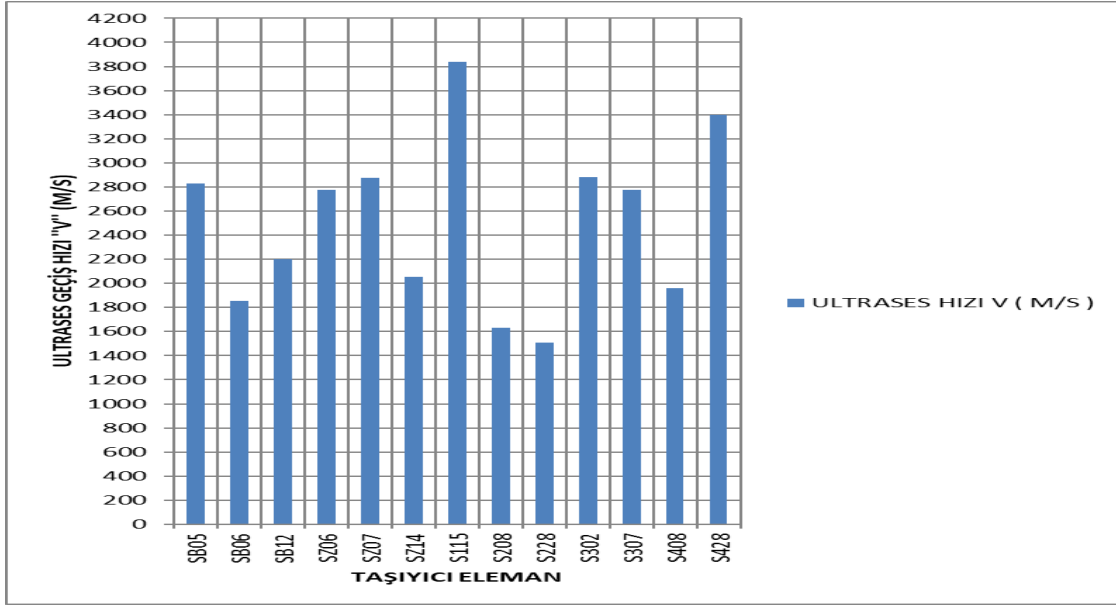
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında İlkon Mühendislik Firmasının 10 farklı betonarme yapıda farklı taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici testi ve ultrases hızı testi sonuçları Şekil 5.1-5.20’de sunulmuştur.



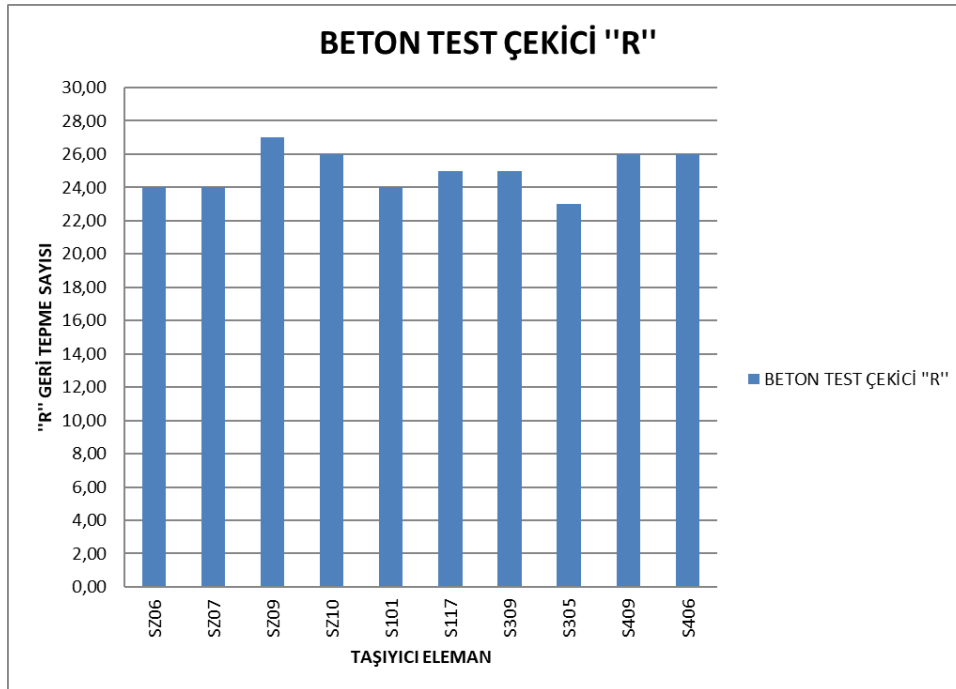
Şekil 5.1. Mesken 1-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.1 özetlenecek olursa Mesken 1’de farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 23-26 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri SB05 ve SB06 kolonlarında, en yüksek geri tepme sayısı değeri de SZ06 kolonunda gözlenmiştir.



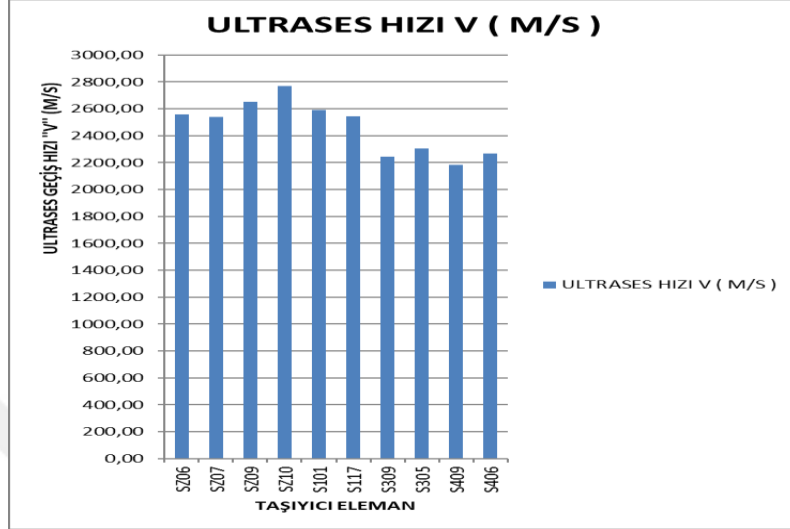
Şekil 5.2. Mesken 1-Ultrases hızı test sonuçları

Şekil 5.2 özetlenecek olursa Mesken 1’de farklı taşıyıcı elemanlarda ultrases hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 1507-3841 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri S228 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de S115 kolonunda gözlenmiştir.



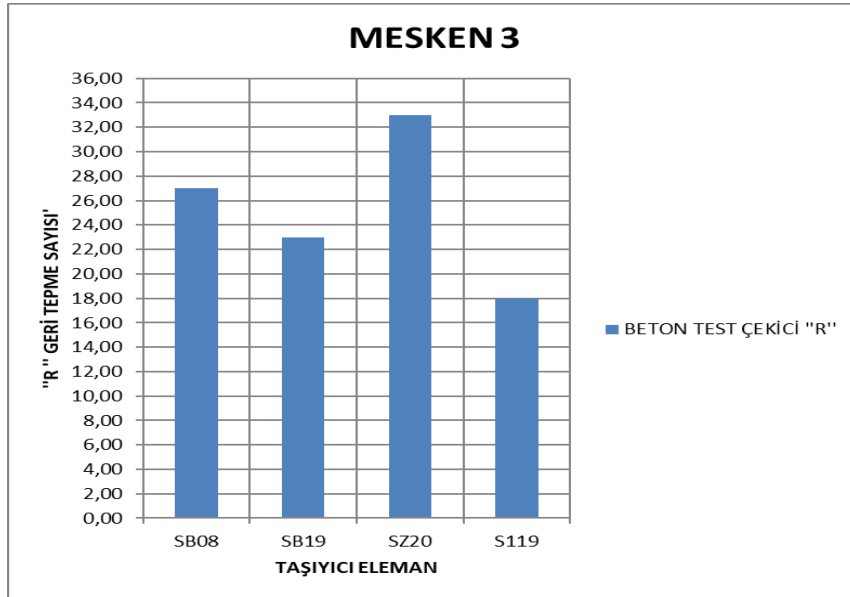
Şekil 5.3. Mesken 2-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.3. özetlenecek olursa Mesken 2’de farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 23-27 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri S305 kolonlarında, en yüksek geri tepme sayısı değeri de SZ09 kolonunda gözlenmiştir.



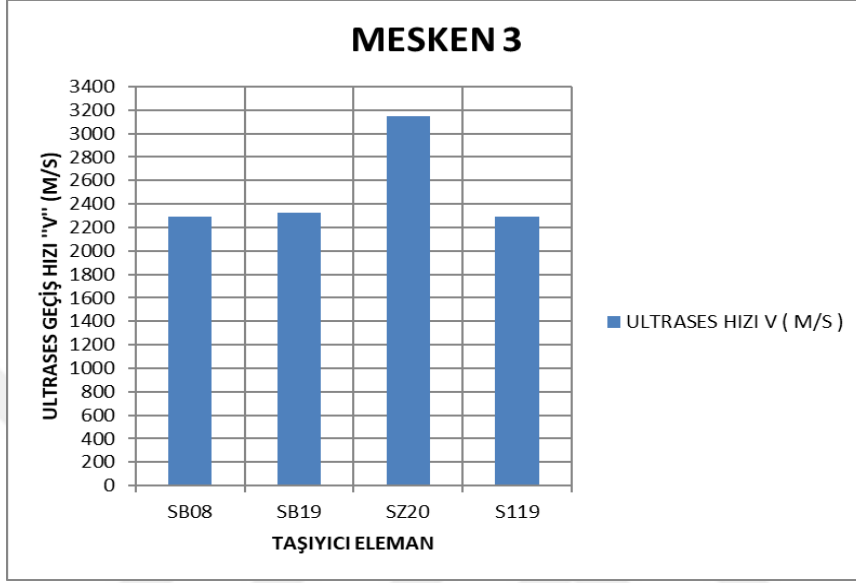
Şekil 5.4. Mesken 2-Ultrasen hızı test sonuçları

Şekil 5.4 özetlenecek olursa Mesken 2’de farklı taşıyıcı elemanlarda ultrasen hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 2184-2770 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri S409 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de SZ10 kolonunda gözlenmiştir.



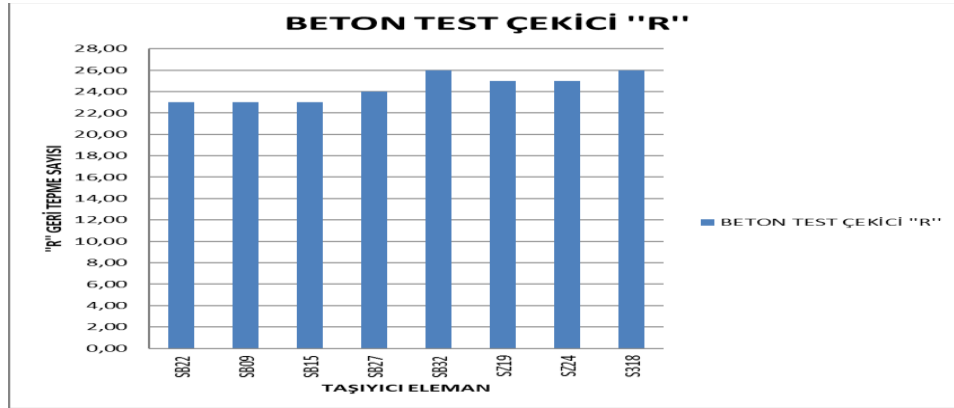
Şekil 5.5. Mesken 3-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.5 özetlenecek olursa Mesken 3’de farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 18-33 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri S119 kolonunda, en yüksek geri tepme sayısı değeri de SZ20 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.6. Mesken 3-Ultrases hızı test sonuçları

Şekil 5.6 özetlenecek olursa Mesken 3’de farklı taşıyıcı elemanlarda ultrases hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 2288-3150 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri SB08 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de SZ20 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.7. Mesken 4-Beton test çekici test sonuçları

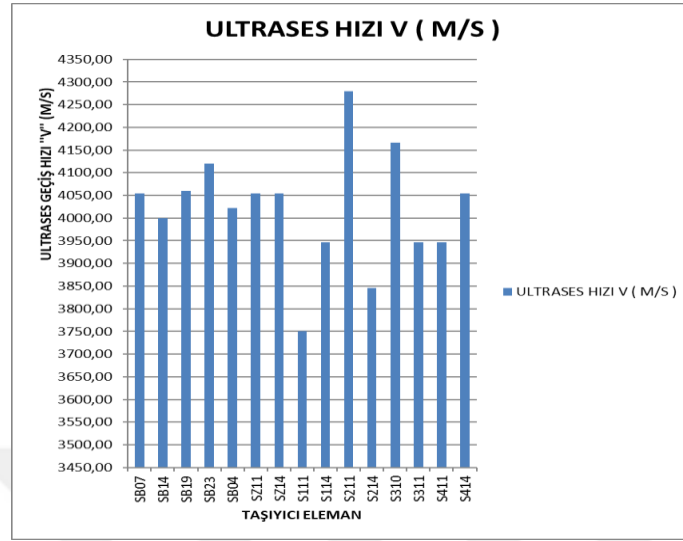
Taşıyıcı Eleman	Ultrason Hızı (m/s)
S922	1000,00
S909	1000,00
S915	1000,00
S927	1000,00
S932	1000,00
S219	1000,00
S274	1000,00
S318	1000,00

Şekil 5.8. Mesken 4-Ultrases hızı test sonuçları

na bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 1967-3485 m/s göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri S318 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri SB22 kolonunda gözlenmiştir.

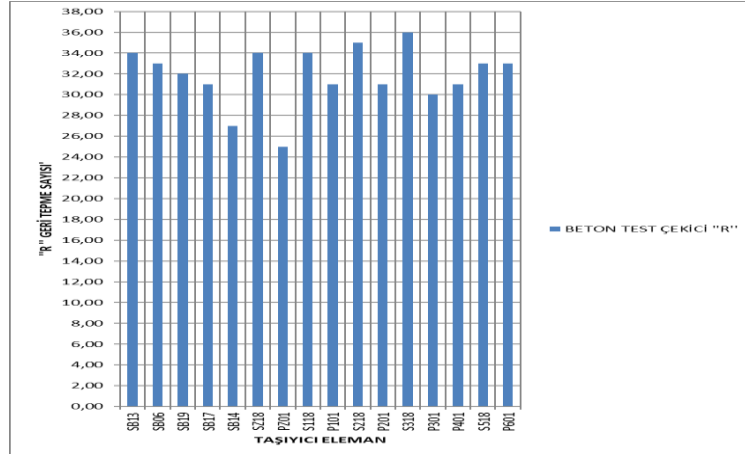
sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 37-39 arasında farklılık

göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri S111 ve S214 kolonlarında, en yüksek geri tepme sayısı değeri de taşıyıcı elemanların 7 tanesinde gözlenmiştir.



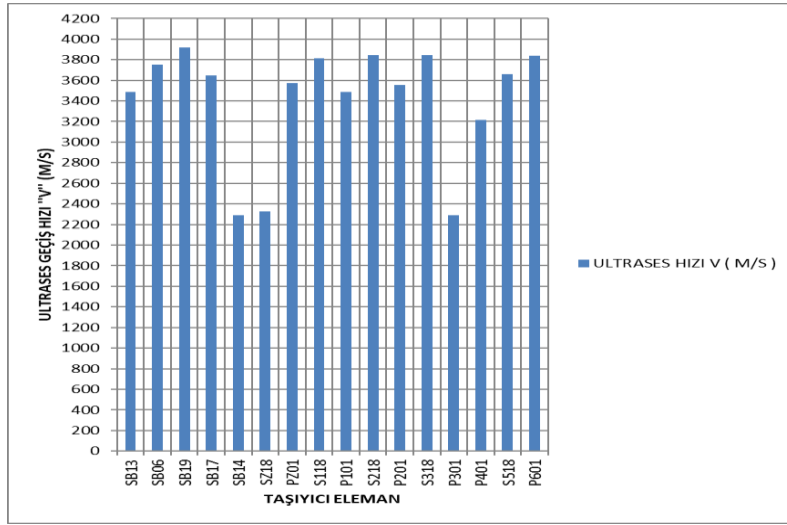
Şekil 5.10. Mesken 5-Ultrasen hızı test sonuçları

Şekil 5.10 özetlenecek olursa Mesken 5’de farklı taşıyıcı elemanlarda ultrasen hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 3750-4280 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri S111 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de S211 kolonunda gözlenmiştir.



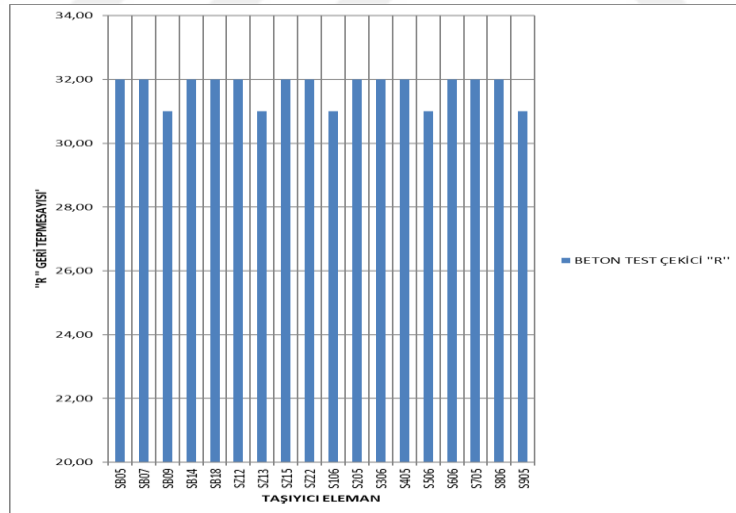
Şekil 5.11. Mesken 6-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.11 özetlenecek olursa Mesken 6’da farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 25-36 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri PZ01 taşıyıcı elemanında , en yüksek geri tepme sayısı değeri de S318 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.12. Mesken 6-Ultrases hızı test sonuçları

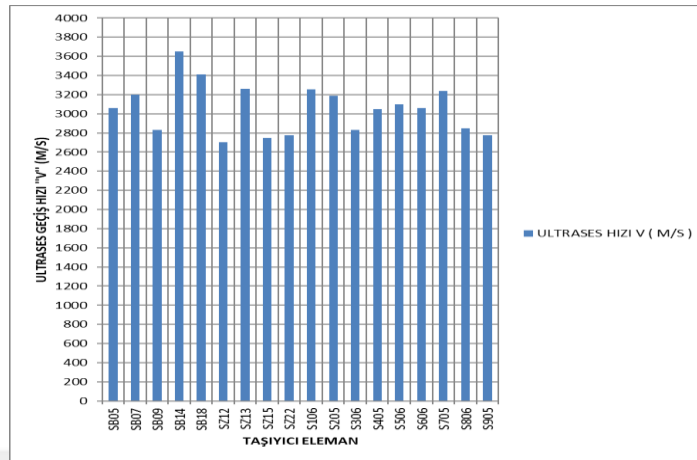
Şekil 5.12 özetlenecek olursa Mesken 6’da farklı taşıyıcı elemanlarda ultrases hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 2290-3920 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri SB14 ve S301 kolonlarında, en yüksek geçiş hızı değeri de SB19 kolonunda gözlenmiştir.



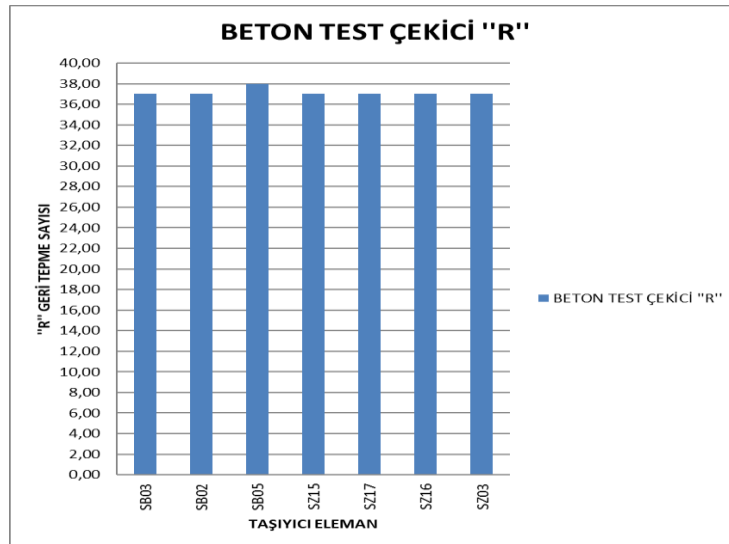
Şekil 5.13. Mesken 7-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.13 özetlenecek olursa Mesken 7’de farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 31-32 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri 5 adet taşıyıcı eleman üzerinde

Şekil 5.14. Mesken 7-Ultrases hızı test sonuçları

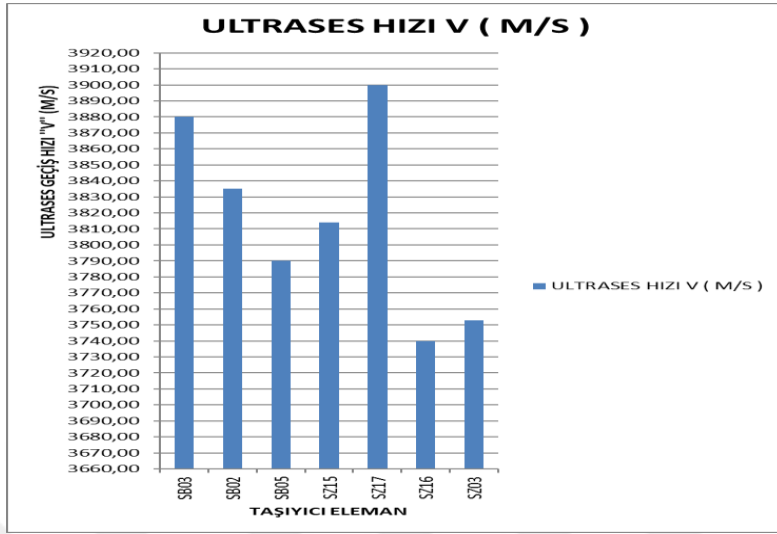


TAŞIYICI ELEMAN	"R" GERİ TEPME SAYISI
SB03	37,00
SB02	37,00
SB05	38,00
SZ15	37,00
SZ17	37,00
SZ16	37,00
SZ03	37,00



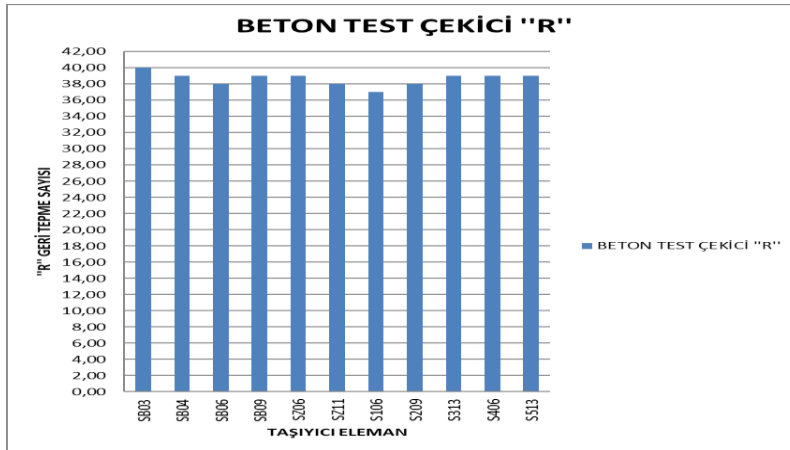
64

37 olan en düşük değeri verirken, en yüksek geri tepme sayısı değeri de SB05 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.16. Mesken 8-Ultrasen hızı test sonuçları

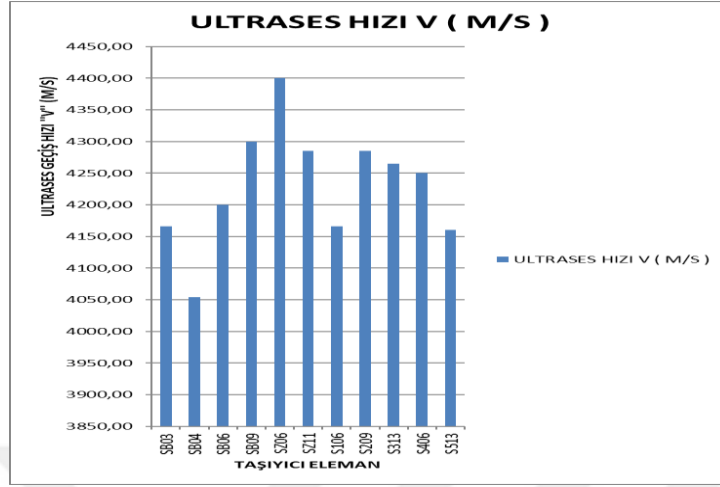
Şekil 5.16 özetlenecek olursa Mesken 8’de farklı taşıyıcı elemanlarda ultrasen hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 3740-3900 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri SZ16 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de SZ17 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.17. Mesken 9-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.17 özetlenecek olursa Mesken 9’da farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 37-40 arasında

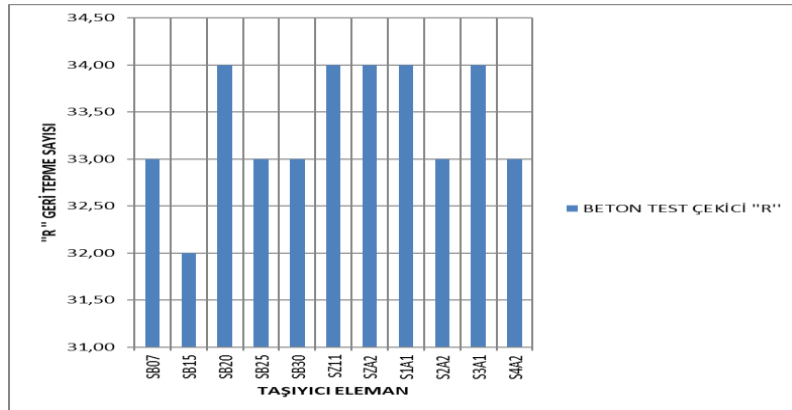
farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri S106 kolonunda, en yüksek geri tepme sayısı değeri de SB03 kolonunda gözlenmiştir.



Şekil 5.18. Mesken 9-Ultrases hızı test sonuçları

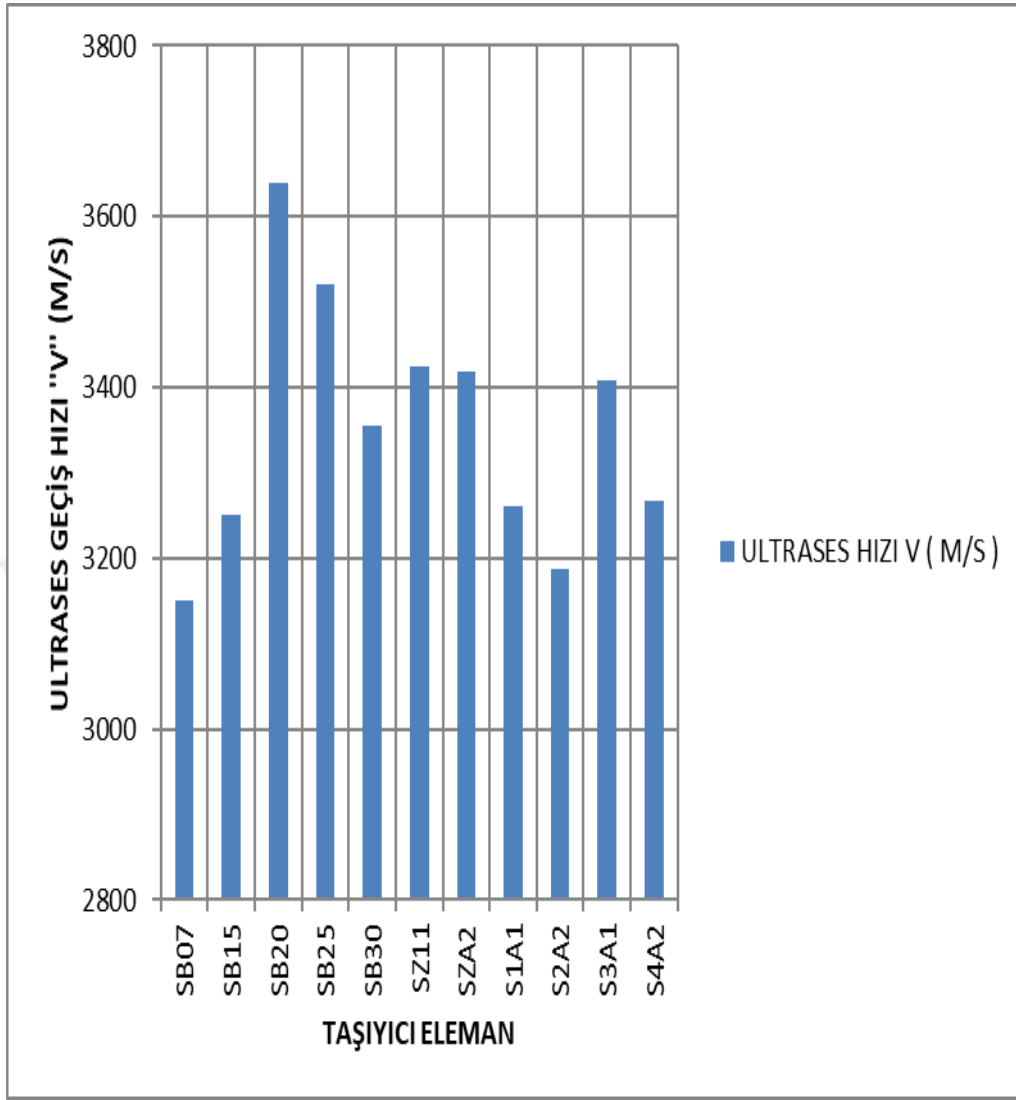
Şekil 5.18 özetlenecek olursa Mesken 9’da farklı taşıyıcı elemanlarda ultrases hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 4054-4400 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri SB04 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de SZ06 kolonunda gözlenmiştir.

.



Şekil 5.19. Mesken 10-Beton test çekici test sonuçları

Şekil 5.19 özetlenecek olursa Mesken 10’da farklı taşıyıcı elemanlarda beton test çekici test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geri tepme sayısı değerlerinin 32-34 arasında farklılık göstermiştir. En düşük geri tepme sayısı değeri SB15 kolonunda, en yüksek geri tepme sayısı değeri de 5 farklı taşıyıcı eleman üzerinde gözlenmiştir.



Şekil 5.20. Mesken 10-Ultrases hızı test sonuçları

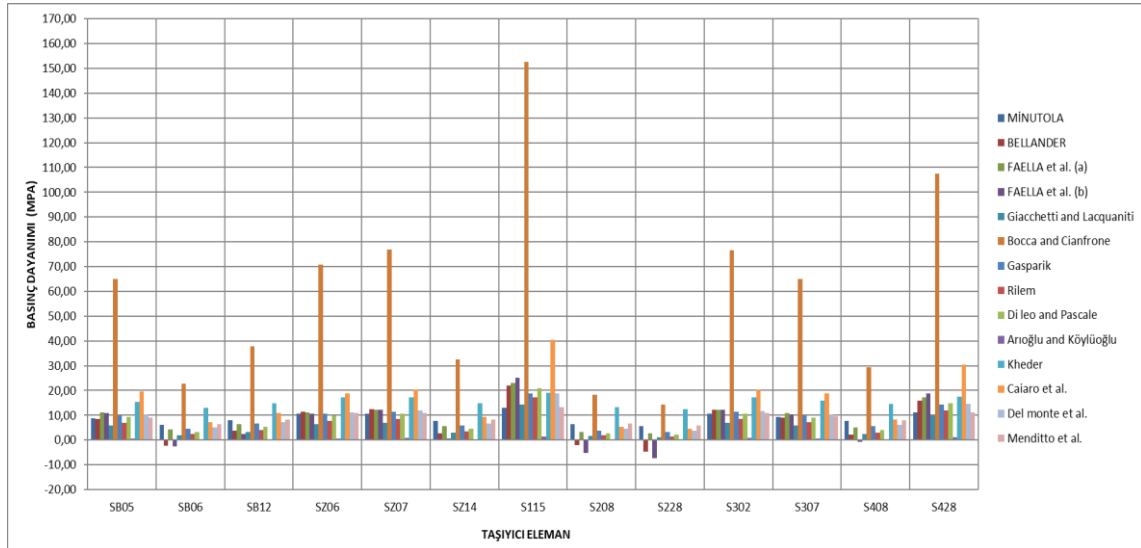
Şekil 5.20 özetlenecek olursa Mesken 10'da farklı taşıyıcı elemanlarda ultrases hızı test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen geçiş hızı değerlerinin 3151-3640 m/s arasında farklılık göstermiştir. En düşük geçiş hızı değeri SB07 kolonunda, en yüksek geçiş hızı değeri de SB20 kolonunda gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında İlkon Mühendislik Firmasının 10 farklı betonarme yapıda farklı taşıyıcı elemanlarda gerçekleştirdiği beton test çekici testi ve ultrases hızı testi sonuçlarının Çizelge 4.1'de yer alan SonReb formülüzasyonlarına uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1-5.10'da aynı sonuçlar grafik halinde ise şekil 5.21-5.30'da sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Mesken 1-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MİNUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Aroğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB05	8,83	8,49	11,03	10,79	5,85	64,87	9,75	7,05	9,18	0,61	15,43	19,72	10,28	9,01
SB06	6,16	-2,24	4,21	-2,69	1,96	22,75	4,47	2,36	3,28	0,22	12,89	7,30	5,04	6,41
SB12	8,08	3,81	6,43	2,49	3,35	37,93	6,66	4,03	5,33	0,37	14,96	10,84	7,25	8,35
SZ06	10,51	11,53	11,16	10,72	6,44	70,86	10,70	7,75	9,78	0,70	17,17	18,73	11,19	10,77
SZ07	10,73	12,44	12,08	12,08	7,01	76,95	11,37	8,45	10,62	0,76	17,34	20,39	11,82	10,98
SZ14	7,83	2,74	5,52	0,53	2,85	32,49	5,96	3,43	4,56	0,32	14,76	9,17	6,55	8,12
S115	13,11	22,10	23,07	25,25	14,35	152,67	18,79	17,28	20,95	1,47	19,07	40,36	18,71	13,23
S208	6,38	-2,10	3,26	-5,34	1,56	18,23	3,87	1,87	2,59	0,18	13,31	5,34	4,42	6,68
S228	5,58	-4,74	2,67	-7,27	1,21	14,31	3,20	1,45	2,06	0,14	12,37	4,44	3,72	5,86
S302	10,65	12,28	12,08	12,09	6,99	76,65	11,32	8,42	10,59	0,76	17,25	20,44	11,77	10,89
S307	9,30	9,07	10,76	10,26	5,86	64,88	9,85	7,06	9,10	0,62	15,95	18,78	10,37	9,51
S408	7,67	2,13	5,01	-0,65	2,57	29,45	5,55	3,10	4,13	0,30	14,65	8,25	6,14	7,98
S428	11,05	15,96	17,12	18,91	9,94	107,53	14,34	11,97	14,96	1,02	17,39	30,34	14,62	11,21

Çizelge 5.1 irdelenecek olursa sonuçların büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bunun sebebi olarak Çizelge 5.1’de yer alan farklı araştırmacıların sunduğu formülüzasyonlara esas olan sabit katsayıların ve beton tahribatsız test sonuçlarının arasında ki hesaplamalardan çıkan farklılıkların olabileceği belirtilebilir. BELANDER’in çalışmasında çıkan sonuçlarda eksi değerlerin çıkması formül içeriğinde sabit olarak seçilen sayının test sonuçlarından gelen değerlerin arasında ki ilişki gösterilebilir. Çizelge 5.1 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.21 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

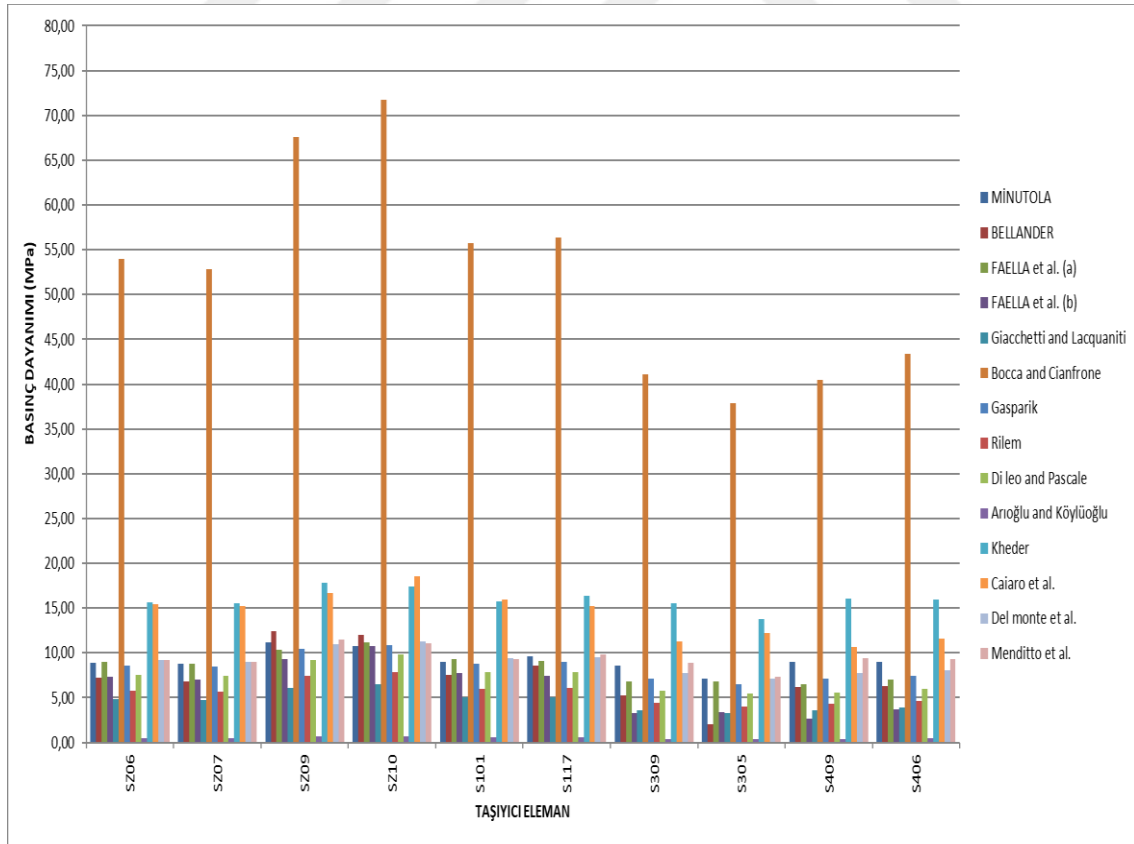


Şekil 5.21. Mesken 1- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.2. Mesken 2-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Arioğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
S206	8,92	7,19	8,99	7,32	4,84	53,98	8,62	5,83	7,57	0,52	15,67	15,45	9,19	9,16
S207	8,79	6,83	8,84	7,07	4,72	52,78	8,47	5,69	7,41	0,51	15,54	15,23	9,04	9,03
S209	11,13	12,45	10,31	9,32	6,13	67,57	10,48	7,39	9,22	0,69	17,85	16,71	10,97	11,45
S210	10,77	12,06	11,18	10,72	6,53	71,78	10,85	7,86	9,87	0,72	17,43	18,60	11,32	11,05
S101	9,02	7,55	9,26	7,78	5,00	55,73	8,83	6,02	7,81	0,54	15,76	15,93	9,39	9,26
S117	9,58	8,58	9,10	7,45	5,07	56,36	9,00	6,10	7,83	0,56	16,37	15,27	9,55	9,86
S309	8,60	5,23	6,80	3,24	3,64	41,08	7,12	4,38	5,73	0,41	15,51	11,31	7,70	8,89
S305	7,12	2,06	6,82	3,38	3,33	37,84	6,49	4,01	5,43	0,35	13,79	12,17	7,09	7,32
S409	9,03	6,22	6,54	2,70	3,59	40,50	7,12	4,32	5,60	0,41	16,01	10,61	7,70	9,37
S406	9,00	6,32	7,06	3,73	3,85	43,38	7,45	4,64	6,02	0,44	15,93	11,61	8,03	9,31

Çizelge 5.2 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arioğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Aynı şekilde formülüzasyonların sabit katsayıları sebep olarak gösterilebilir. Çizelge 5.2 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.22 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

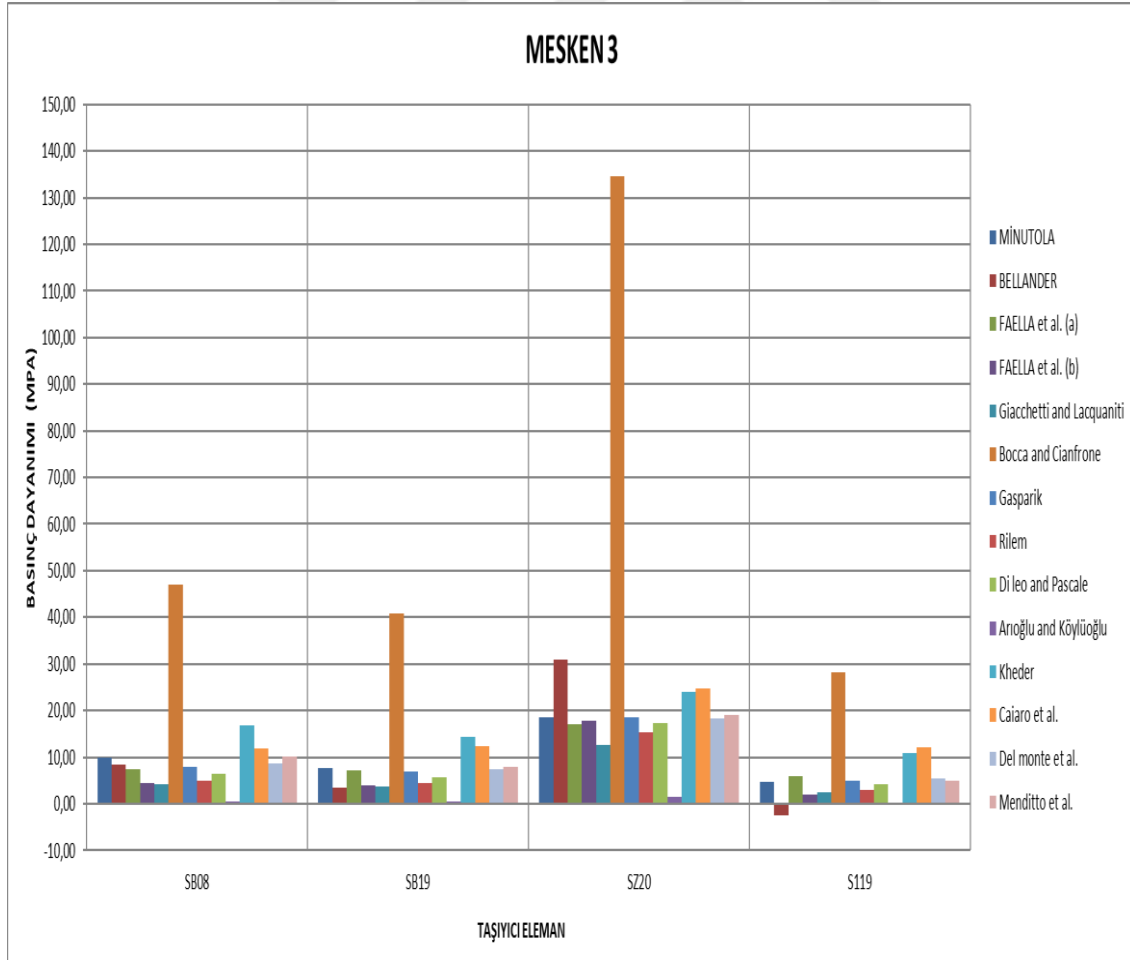


Şekil 5.22. Mesken 2- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.3. Mesken 3-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Arioğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB08	9,82	8,48	7,38	4,34	4,20	47,00	8,00	5,06	6,45	0,48	16,77	11,84	8,57	10,17
SB19	7,70	3,44	7,11	3,92	3,60	40,73	6,92	4,34	5,79	0,39	14,45	12,41	7,52	7,93
SZ20	18,57	30,85	17,02	17,81	12,68	134,60	18,46	15,28	17,34	1,51	23,96	24,80	18,35	19,10
S119	4,80	-2,48	5,99	2,02	2,44	28,23	4,93	2,93	4,27	0,24	10,88	12,13	5,53	4,91

Çizelge 5.3 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arioğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bellander de ise sonuçların farklı taşıyıcı eleman üzerinde birbirlerinden çok uzak değerler verdiği görülmüş olup bunun sebebi olarak formül içerisinde kullanılan geçiş hızı değerinin etkili olduğu görülmüştür. Çizelge 5.3 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.23 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

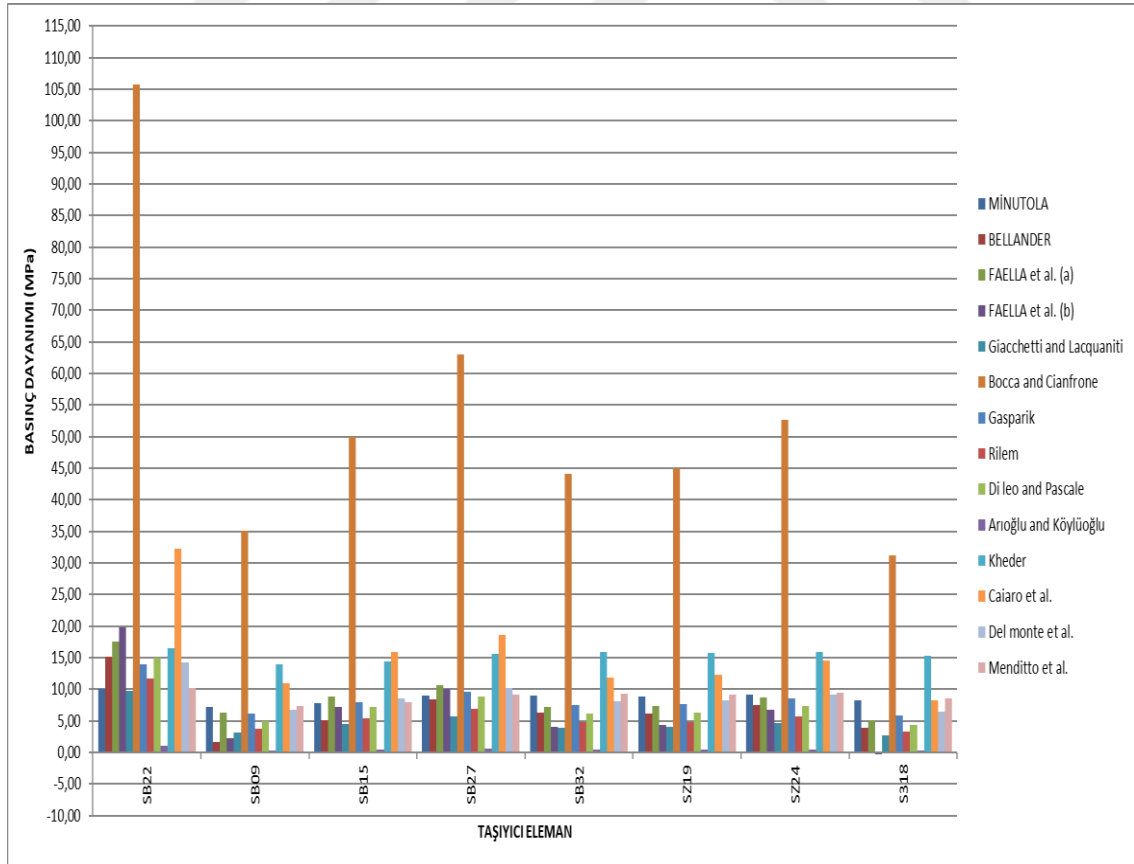


Şekil 5.23. Mesken 3- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.4. Mesken 4-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMEN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gaspari k	Rilem	Di leo and Pascale	Arnoğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB22	10,12	15,08	17,55	19,73	9,75	105,78	13,94	11,75	14,93	0,97	16,44	32,29	14,26	10,23
SB09	7,15	1,65	6,26	2,20	3,08	35,07	6,17	3,71	5,02	0,33	13,89	11,00	6,77	7,37
SB15	7,83	5,08	8,81	7,16	4,45	49,98	7,98	5,36	7,14	0,47	14,47	15,85	8,57	8,01
SB27	9,00	8,44	10,58	10,02	5,68	62,98	9,59	6,84	8,87	0,60	15,64	18,64	10,13	9,20
SB32	9,00	6,36	7,20	4,00	3,93	44,15	7,54	4,73	6,13	0,44	15,91	11,88	8,12	9,30
SZ19	8,88	6,17	7,41	4,42	4,01	45,07	7,62	4,83	6,28	0,45	15,75	12,35	8,21	9,16
SZ24	9,17	7,47	8,65	6,69	4,72	52,71	8,53	5,69	7,35	0,52	15,97	14,61	9,10	9,44
S318	8,26	3,83	5,15	-0,30	2,73	31,22	5,86	3,29	4,34	0,32	15,32	8,28	6,45	8,61

Çizelge 5.4 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arnoğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak sunulan formülüzasyonlara esas olan beton özelliklerinin farklı olabileceği belirtilebilir. Çizelge 5.4 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.24 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

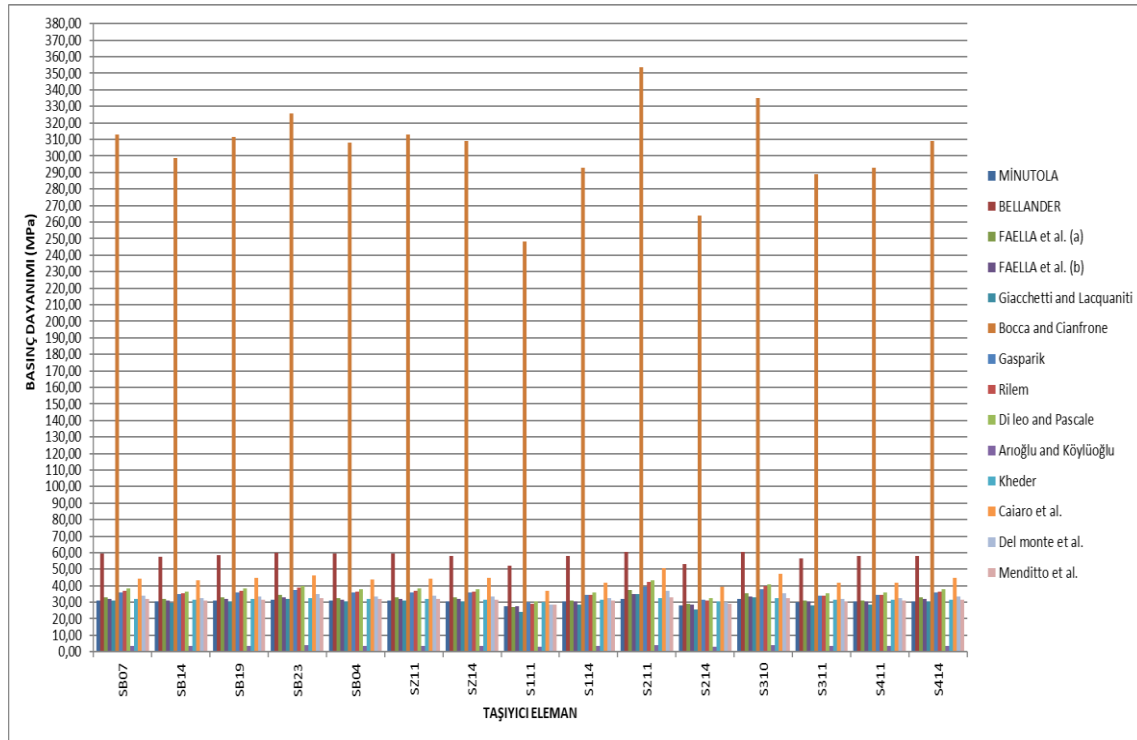


Şekil 5.24. Mesken 4- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.5. Mesken 5-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Arioğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB07	31,22	59,27	33,11	31,89	30,78	312,98	36,16	37,08	38,28	3,79	32,07	44,48	33,85	31,94
SB14	30,32	57,31	31,94	31,04	29,33	298,87	34,84	35,33	36,66	3,61	31,55	43,13	32,73	31,02
SB19	30,89	58,42	33,11	31,90	30,62	311,47	35,96	36,89	38,16	3,76	31,86	44,66	33,69	31,59
SB23	31,65	60,00	34,36	32,80	32,10	325,81	37,25	38,67	39,82	3,95	32,29	46,21	34,79	32,36
SB04	31,20	59,37	32,57	31,48	30,29	308,18	35,77	36,49	37,67	3,74	32,08	43,65	33,52	31,93
SZ11	31,22	59,27	33,11	31,89	30,78	312,98	36,16	37,08	38,28	3,79	32,07	44,48	33,85	31,94
SZ14	30,66	57,90	32,94	31,79	30,37	309,00	35,72	36,58	37,89	3,73	31,73	44,51	33,48	31,36
S111	27,66	51,90	27,27	27,38	24,12	248,03	30,17	29,05	30,66	2,97	30,02	37,08	28,70	28,37
S114	30,52	58,09	31,14	30,41	28,72	292,84	34,41	34,59	35,86	3,55	31,71	41,76	32,36	31,26
S211	32,11	60,40	37,29	34,92	34,97	353,64	39,49	42,12	43,26	4,26	32,47	50,59	36,70	32,76
S214	28,27	52,96	28,89	28,71	25,76	264,12	31,61	31,03	32,62	3,16	30,34	39,36	29,95	28,95
S310	31,96	60,50	35,24	33,44	33,04	334,93	38,03	39,81	40,92	4,06	32,45	47,44	35,45	32,65
S311	29,97	56,72	30,98	30,31	28,33	289,12	34,00	34,12	35,49	3,49	31,37	41,79	32,00	30,69
S411	30,52	58,09	31,14	30,41	28,72	292,84	34,41	34,59	35,86	3,55	31,71	41,76	32,36	31,26
S414	30,66	57,90	32,94	31,79	30,37	309,00	35,72	36,58	37,89	3,73	31,73	44,51	33,48	31,36

Çizelge 5.5 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arioğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak sunulan formülüzasyonlara esas olan beton özelliklerinin farklı olabileceği belirtilebilir. Çizelge 5.5 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.25 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

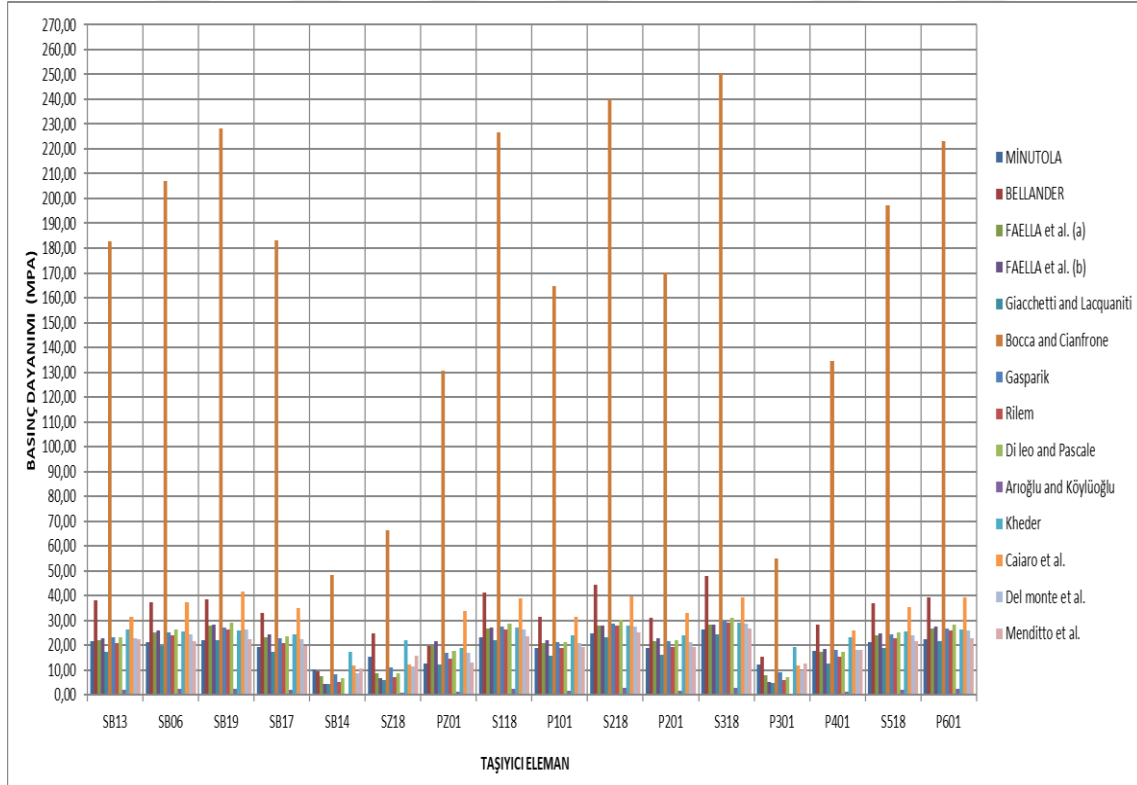


Şekil 5.25. Mesken 5- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.6. Mesken 6-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MİNUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Aroğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB13	21,84	38,33	21,93	22,81	17,47	182,65	23,42	21,04	23,20	2,09	26,19	31,39	22,80	22,39
SB06	21,40	37,16	25,34	26,11	19,87	206,90	25,39	23,94	26,50	2,30	25,70	37,48	24,56	21,84
SB19	21,90	38,36	27,90	28,37	22,03	228,40	27,27	26,54	29,25	2,53	25,96	41,58	26,21	22,30
SB17	19,44	32,85	23,26	24,33	17,48	183,17	22,95	21,05	23,72	2,00	24,31	35,14	22,40	19,83
SB14	10,25	9,61	7,48	4,50	4,33	48,43	8,23	5,22	6,61	0,50	17,21	11,82	8,79	10,62
SZ18	15,27	24,84	8,67	6,71	6,05	66,25	10,99	7,29	8,57	0,77	21,87	12,11	11,43	15,93
PZ01	12,78	19,89	19,74	21,65	12,21	130,74	16,84	14,71	17,90	1,28	18,90	33,93	16,92	12,96
S118	23,27	41,27	26,88	27,33	21,89	226,69	27,45	26,37	28,73	2,57	27,00	38,91	26,36	23,76
P101	18,85	31,40	21,05	22,16	15,65	164,80	21,23	18,85	21,36	1,81	23,96	31,63	20,86	19,27
SZ18	24,72	44,50	27,79	28,01	23,27	240,14	28,88	28,03	30,21	2,77	27,98	39,56	27,60	25,26
PZ01	18,74	31,25	21,86	23,00	16,18	170,22	21,68	19,50	22,11	1,85	23,83	33,13	21,27	19,14
S318	26,21	47,98	28,27	28,31	24,33	250,35	30,05	29,30	31,24	2,93	28,99	39,47	28,61	26,81
P301	12,22	15,26	7,87	5,23	4,95	54,88	9,27	5,97	7,31	0,60	19,14	11,75	9,79	12,71
P401	17,59	28,40	17,48	18,39	12,67	134,67	18,27	15,27	17,51	1,48	23,14	26,11	18,19	18,05
S518	21,39	37,12	24,06	24,91	18,90	197,18	24,57	22,77	25,20	2,21	25,75	35,27	23,83	21,86
P601	22,43	39,42	26,88	27,41	21,50	223,01	26,96	25,90	28,42	2,50	26,39	39,45	25,93	22,88

Çizelge 5.6 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Aroğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Çizelge 5.6 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.26 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

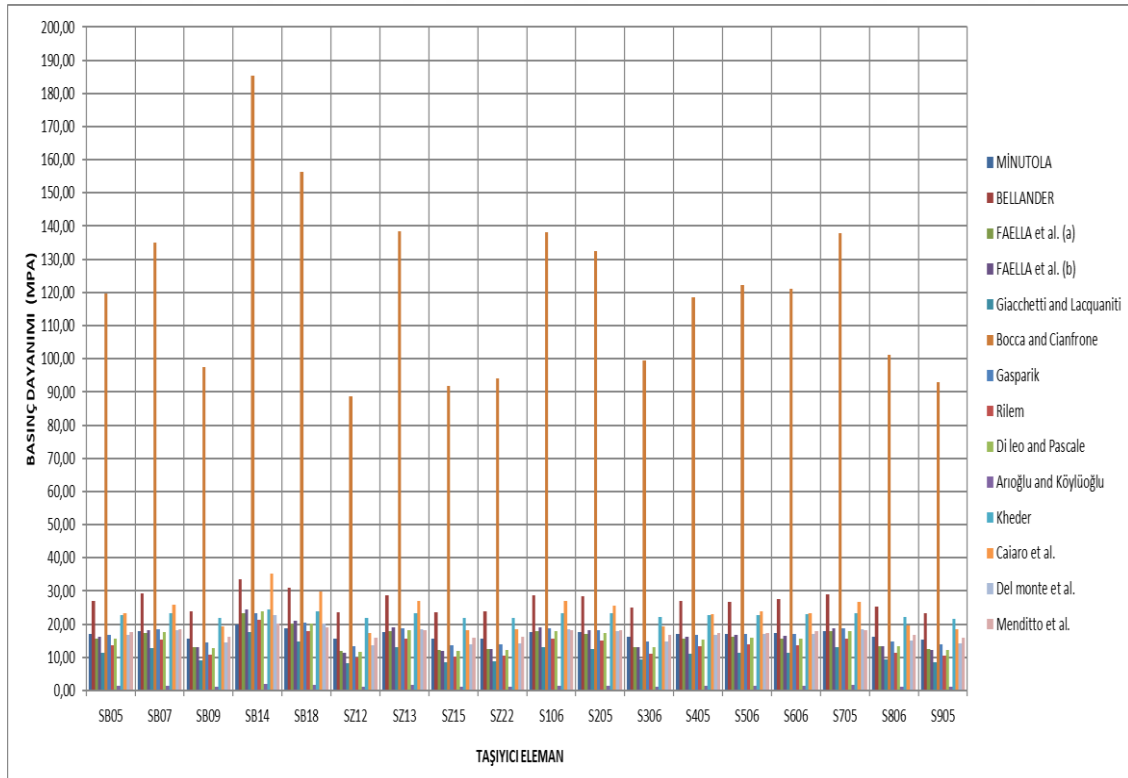


Şekil 5.26. Mesken 6- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.7. Mesken 7-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MİNUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Arnoğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB05	16,99	27,00	15,65	16,28	11,21	119,72	16,76	13,50	15,58	1,32	22,76	23,23	16,81	17,47
SB07	17,90	29,15	17,39	18,27	12,72	135,09	18,37	15,32	17,52	1,50	23,40	25,79	18,28	18,38
SB09	15,66	23,84	13,02	13,01	9,04	97,48	14,35	10,89	12,75	1,08	21,82	19,32	14,59	16,15
SB14	19,74	33,50	23,40	24,43	17,71	185,46	23,21	21,33	23,97	2,03	24,53	35,19	22,63	20,14
SB18	18,62	30,84	20,02	21,10	14,83	156,49	20,45	17,86	20,28	1,72	23,83	29,95	20,16	19,06
SZ12	15,49	23,64	11,79	11,34	8,18	88,54	13,42	9,85	11,56	0,99	21,77	17,27	13,72	16,02
SZ13	17,66	28,58	17,99	18,97	13,06	138,58	18,64	15,73	18,03	1,52	23,17	26,97	18,53	18,11
SZ15	15,51	23,57	12,24	11,97	8,48	91,72	13,75	10,22	11,99	1,02	21,75	18,04	14,02	16,02
SZ22	15,64	23,87	12,52	12,34	8,70	93,97	14,00	10,48	12,28	1,04	21,84	18,46	14,26	16,15
S106	17,65	28,54	17,94	18,91	13,01	138,15	18,60	15,68	17,97	1,52	23,16	26,89	18,49	18,09
S205	17,58	28,39	17,16	18,02	12,45	132,36	18,06	14,99	17,20	1,46	23,16	25,55	17,99	18,05
S306	16,12	25,07	13,13	13,14	9,24	99,52	14,64	11,13	12,97	1,11	22,21	19,29	14,85	16,64
S405	16,94	26,88	15,52	16,12	11,10	118,66	16,65	13,38	15,45	1,31	22,73	23,04	16,71	17,42
S506	16,92	26,82	16,04	16,75	11,45	122,27	16,99	13,80	15,94	1,35	22,68	23,95	17,02	17,39
S606	17,24	27,62	15,71	16,34	11,33	120,97	16,92	13,65	15,71	1,34	22,96	23,22	16,96	17,73
S705	17,83	28,97	17,82	18,75	12,99	137,90	18,62	15,65	17,91	1,52	23,32	26,57	18,50	18,29
S806	16,22	25,29	13,34	13,42	9,41	101,28	14,83	11,34	13,19	1,13	22,28	19,62	15,03	16,74
S905	15,41	23,26	12,47	12,28	8,60	93,00	13,86	10,37	12,18	1,03	21,65	18,47	14,13	15,91

Çizelge 5.7 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arnoğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Çizelge 5.7 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.27 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

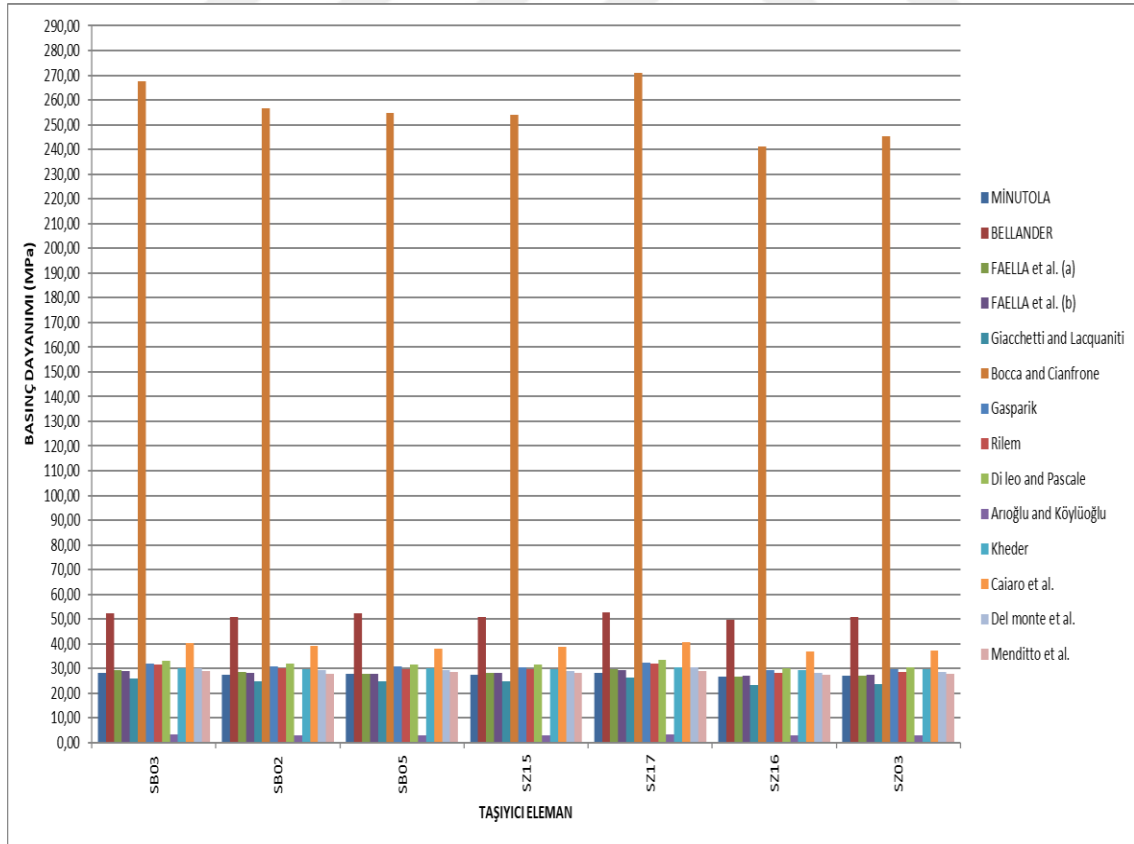


Şekil 5.27. Mesken 7- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.8. Mesken 8-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMEN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gaspari k	Rilem	Di leo and Pascale	Aroğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB03	28,13	52,48	29,37	29,11	26,11	267,61	31,87	31,45	33,09	3,19	30,23	40,21	30,17	28,79
SB02	27,34	50,72	28,45	28,39	24,97	256,53	30,79	30,08	31,82	3,04	29,74	39,14	29,25	27,99
SB05	27,92	52,35	27,94	27,93	24,79	254,66	30,77	29,87	31,47	3,05	30,16	38,02	29,22	28,61
SZ15	27,38	50,90	28,14	28,13	24,73	254,17	30,61	29,80	31,51	3,02	29,79	38,63	29,09	28,04
SZ17	28,25	52,70	29,72	29,39	26,46	271,05	32,17	31,87	33,51	3,23	30,30	40,70	30,44	28,91
SZ16	26,76	49,67	26,86	27,07	23,39	241,01	29,40	28,18	29,92	2,86	29,43	36,89	28,04	27,42
SZ03	27,17	50,65	27,17	27,32	23,83	245,26	29,84	28,71	30,40	2,92	29,69	37,18	28,42	27,85

Çizelge 5.8 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Aroğlu and Köylüoğlu , Bellander ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak sunulan formülüzasyonlara esas olan beton özelliklerinin ve sabit kat sayılarının farklılıkların etkili olabileceği belirtilebilir. Çizelge 5.8 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.28 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

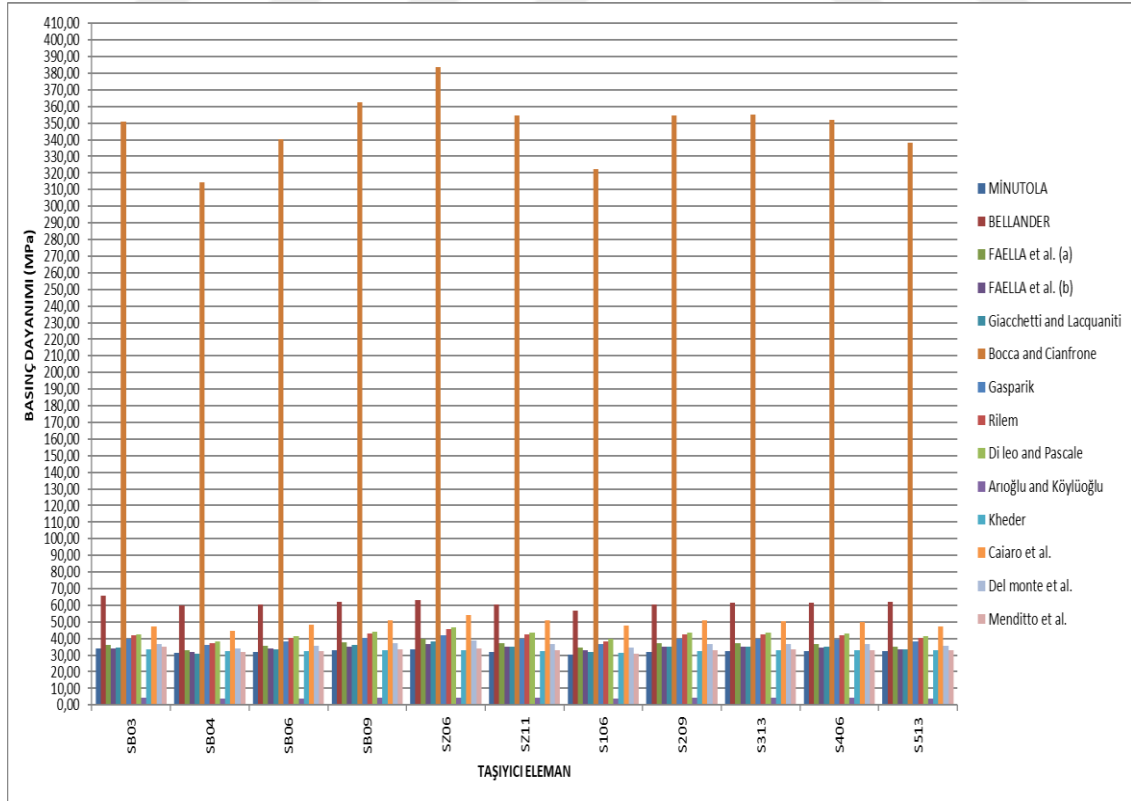


Şekil 5.28. Mesken 8- SonReb analiz test sonuçları

Çizelge 5.9. Mesken 9-Tez çalışmasında kullanılan SonReb formülüzasyonlarında analiz sonuçları

TAŞIYICI ELEMAN	MINUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Arioğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB03	34,09	65,73	35,90	33,80	34,70	350,65	39,72	41,81	42,46	4,32	33,74	47,33	36,87	34,87
SB04	31,41	59,73	33,17	31,92	30,92	314,31	36,30	37,25	38,41	3,82	32,19	44,47	33,98	32,13
SB06	31,99	60,42	35,84	33,88	33,60	340,32	38,45	40,47	41,60	4,11	32,44	48,37	35,81	32,67
SB09	32,83	61,98	37,89	35,29	35,88	362,37	40,32	43,22	44,21	4,38	32,89	51,12	37,40	33,50
SZ06	33,48	63,08	39,93	36,68	38,09	383,69	42,07	45,89	46,77	4,63	33,21	53,97	38,88	34,13
SZ11	32,15	60,45	37,39	34,99	35,07	354,67	39,58	42,25	43,39	4,27	32,48	50,73	36,77	32,80
S106	30,26	56,49	34,69	33,14	31,70	322,20	36,65	38,19	39,66	3,84	31,39	47,53	34,29	30,89
S209	32,15	60,45	37,39	34,99	35,07	354,67	39,58	42,25	43,39	4,27	32,48	50,73	36,77	32,80
S313	32,60	61,59	37,18	34,81	35,12	355,08	39,71	42,31	43,34	4,29	32,77	50,14	36,88	33,28
S406	32,50	61,43	36,89	34,60	34,80	351,98	39,46	41,93	42,97	4,26	32,72	49,73	36,66	33,18
S513	32,49	61,83	35,30	33,46	33,37	337,99	38,38	40,20	41,19	4,11	32,78	47,25	35,75	33,21

Çizelge 5.9 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arioğlu and Köylüoğlu , Bellander ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak sunulan formülüzasyonlara esas olan beton özelliklerinin ve sabit kat sayılarının farklılıkların etkili olabileceği belirtilebilir. Çizelge 5.9 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.29 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.

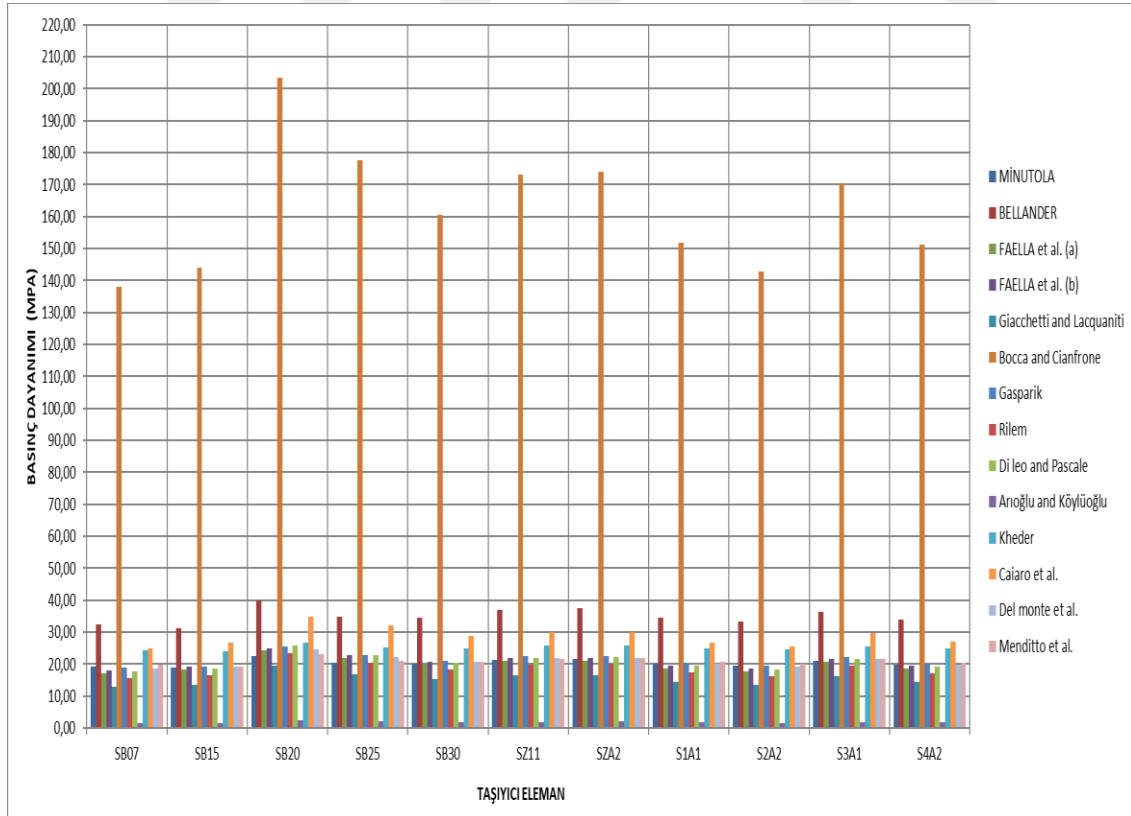


Şekil 5.29. Mesken 9- SonReb analiz test sonuçları

**Çizelge 5.10. Mesken 10-Tez çalışmasında kullanılan SonReb
formülüzasyonlarında analiz sonuçları**

TAŞIYICI ELEMEN	MİNUTOLA	BELLANDER	FAELLA et al. (a)	FAELLA et al. (b)	Giacchetti and Lacquaniti	Bocca and Cianfrone	Gasparik	Rilem	Di leo and Pascale	Anoğlu and Köylüoğlu	Kheder	Caiaro et al.	Del monte et al.	Menditto et al.
SB07	19,24	32,54	17,21	17,99	13,03	138,09	18,91	15,70	17,71	1,57	24,47	24,79	18,76	19,79
SB15	18,80	31,30	18,21	19,13	13,61	144,02	19,37	16,39	18,57	1,61	24,07	26,71	19,18	19,30
SB20	22,66	40,04	24,22	24,96	19,56	203,53	25,39	23,56	25,80	2,32	26,68	34,79	24,54	23,19
SB25	20,42	34,94	21,96	22,95	16,94	177,54	22,68	20,40	22,77	1,99	25,12	32,25	22,15	20,89
SB30	20,15	34,45	19,82	20,78	15,26	160,61	21,14	18,38	20,56	1,82	25,03	28,75	20,77	20,68
SZ11	21,23	36,95	20,99	21,91	16,53	173,25	22,48	19,91	22,06	1,98	25,78	30,15	21,96	21,77
SZA2	21,48	37,59	20,97	21,88	16,61	174,04	22,60	20,01	22,12	1,99	25,97	29,99	22,06	22,04
S1A1	20,08	34,44	18,69	19,58	14,40	151,87	20,34	17,34	19,41	1,73	25,04	26,86	20,04	20,64
S2A2	19,56	33,28	17,69	18,52	13,49	142,74	19,40	16,25	18,28	1,62	24,70	25,45	19,20	20,12
S3A1	21,00	36,42	20,72	21,66	16,24	170,42	22,18	19,57	21,72	1,94	25,63	29,82	21,69	21,54
S4A2	19,84	33,82	18,69	19,59	14,31	151,08	20,22	17,24	19,35	1,71	24,85	26,99	19,94	20,38

Çizelge 5.10 irdelenecek olursa sonuçların Boca and Cianfrone , Arıoğlu and Köylüoğlu , Kheder ve Caiaro et al. uygulamaları diğer çalışmalara oranla büyük ölçüde farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu 4 çalışma haricindeki çalışmalar ise neredeyse aynı sonuçları verdiği görülmüştür. Bunun sebebi olarak sunulan formülüzasyonlara esas olan beton özelliklerinin ve sabit kat sayılarının farklılıkların etkili olabileceği belirtilebilir. Çizelge 5.10 de ki sonuçların formüller arasında ki farklılıkların daha iyi görülmesi için de Şekil 5.30 de grafik halinde aşağıda sunulmuştur.



Şekil 5.30. Mesken 10- SonReb analiz test sonuçları



6. GENEL SONUÇLAR

- Yapılan çalışmalar sonucunda görüldüğü üzere çıkan sonuçların genel formülizasyonlarda yakın değerler verse de bazı sonuçlar da çok farklılıklar gözükmektedir. Bunun sebebi formüllerde ki sabit katsayılar gösterilebilir . Bu nedenle değerlendirmenin güvenilirliğini bilmek, teşhis kalitesini veya maliyetini iyileştirme konusunda karar vermek için gereklidir.
- NDT testlerinin SonReb methodunda çok etkili olduğu ve sonucu önemli derecede etkilediği farklı formüller içerisinde ve karşılaştırmalarında görülmüştür.
- Birçok faktör nedeniyle, tek bir NDT kullanımına kıyasla SonReb'in verimliliği daha iyi olduğu görülse de SonReb'in verimliliği konusunda bir fikir birliği olmadığını belirtmek önemlidir.
- SonReb yöntemi, mevcut yapılar için pratik ve etkili bir çözüm sunmakta, beton dayanımının tahmininde yüksek hassasiyet sağlamaktadır.
- Deney noktası sayısının artması, yerinde betonu daha iyi temsil etme kapasitesini artırır. Türkiye’de yapıların depreme karşı dayanımlarının araştırılmasında bileşik yıkıntısız yöntemin kullanımı, yerinde beton dayanımının hızlı ve etkili bir şekilde belirlenmesine önemli katkılar sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Abbaszadeh, H., Güneş, O.** (2018). *Investigation of Alternative Strategies for Optimum Reliability in Condition Assessment of Existing RC Buildings Using NDT Methods* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı.
- Abdullah, V.S., Aydın, E.** (2016). *Ultrasonik Dalga Hızı Ölçümü Yardımıyla Betonun Elastisite Modülünün Belirlenmesi* (Yüksek Lisans). Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Diyarbakır.
- Alavi, S.A., Noel, M., Moradi, F., Layssi, H.** (2024). Development of a Machine Learning Model for On-Site Evaluation of Concrete Compressive Strength by SonReb, *Journal of Building Engineering*, Volume 82, 108328.
- Alver, N.** (2013). Betondaki Hasarların Ultrasonik-Eko Yöntemiyle Tahribatsız Olarak Belirlenmesi (Tübitak Projesi). Proje No: 110M585, İzmir.
- Alwash, M., Breysse, D., Sbartai, Z.M.** (2015). Non-destructive Strength Evaluation of Concrete: Analysis of Some Key Factors Using Synthetic Simulations, *Construction and Building Materials*, Volume 99, Pages 235-245.
- Ardahanlı, M., Oltulu, M.** (2020). *Atık Seramik, Çinko Cürufu ve Obsidiyen Kullanılarak Üretilen Betonların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Asan, M., Abbaszadeh, H., Karatosun, S.** (2018). An Evaluation on Low and Middle Strength Concretes Rebound, Upv, and Sonreb Methods, International Academic Conference on Applied Research in Engineering, Science&Technology, Brussels, Belgium.
- Aydın, F., Sarıbiyık, M.** (2007). Beton Kalitesinin Tahribatsız Yöntemlerle Yerinde Belirlenmesi ve Deprem Hasarları Üzerindeki Etkisi, International Symposium on Advances in Earthquake & Structural Engineering, October 24-26, Süleyman Demirel University, Isparta-Antalya, Turkey.
- Başka, M.A., Ekmekyapar, T.** (2006). *Betonun Basınç Dayanımının Belirlenmesi ve Değerlendirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Erzurum.
- Bayram, M.M., Kılınç, K.** (2021). *İstanbul İli Avcılar Bölgesinde 2000 Yılı Öncesinde Yapımı Tamamlanmış Binaların Tahribatsız Muayene Yöntemleri ile Deprem Risk Düzeyinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırklareli.
- Breccolotti, M., Bonfigli, M.** (2015). I-SonReb: An Improved NDT Method to Evaluate the In-Situ Strength of Carbonated Concrete, *Non-Destructive Testing and Evaluation*, Vol. 30, No. 4, 327-346.
- Breccolotti, M., Bonfigli, M.F., Materazzi, A.L.** (2018). SonReb Concrete Assessment for Spatially Correlated NDT Data, *Construction and Building Materials*, 192, 391-402.

- Brencich, A., Bovolenta, R., Ghiggi, V., Pera, D., Redaelli, P.** (2020). Rebound Hammer Test: An Investigation into Its Reliability in Applications on Concrete Structures, *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2020, Article ID 6450183, 11 pages, <https://doi.org/10.1155/2020/6450183>.
- Breysse, D., Balayssac, J.P.** (2018). Strength Assessment in Reinforced Concrete Structures: From Research to Improved Practices, *Construction and Building Materials*, Volume 182, 10, Pages 1-9.
- Brozovsky, J.** (2014). Determine the Compressive Strength of Calcium Silicate Bricks by Combined Non-destructive Method, Hindawi Publishing Corporation, *The Scientific World Journal*, Article ID 829794, 5 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/829794>.
- Chandak, N.R., Kumavat, H.R.** (2020). SonReb Method for Evaluation of Compressive Strength of Concrete, ICEMEM-2019, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 810, 012071, IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/810/1/012071.
- Chingalata, C., Budescu, M., Lupașteanu, R.** (2017). Accuracy in Predicting the Compressive Strength of Concrete Using SonReb Method, *BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI, Publicat de Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Volumul 63 (67), Numărul 3, Secția, CONSTRUCȚII. ARHITECTURĂ*.
- Craeye, B., Laar, H.V.D., Eijk, J.V.D., Gijbels, W., Lauriks, L.** (2017). On-site Strength Assessment of Limestone Based Concrete Slabs by Combining Non-destructive Techniques, *Journal of Building Engineering*, 13, 216-223.
- Cristofaro, M.T., Ambrisi, A.D., Stefano, M.D., Tanganelli, M.** (2012). Mechanical Characterization of Concrete from Existing Buildings with Sonreb Method, 15 WCEE, LISBOA.
- Cristofaro, M.T., Viti, S., Tanganelli, M.** (2020). New Predictive Models to Evaluate Concrete Compressive Strength Using the SonReb Method, *Journal of Building Engineering*, 27, 100962.
- Du, G., Bu, L., Hou, Q., Zhou, J., Lu, B.** (2021). Prediction of the compressive strength of high-performance self-compacting concrete by an ultrasonic-rebound method based on a GA-BP neural network, *PLoS ONE* 16(5): e0250795. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250795>.
- Eddin, M.B., Pageot, D., Abraham, O., Hasni, A., Chammas, R., Dridi, E.** (2022). Adaptation of the SonReb Method to the Measurement of the Compressive Strength of a Two-Layer Concrete, NDT-CE 2022-The International Symposium on Nondestructive Testing in Civil Engineering, Zurich, Switzerland.
- Frappa, G., Miceli, M., Pauletta, M.** (2022). Destructive and non-destructive tests on columns and cube specimens made with the same concrete mix, *Construction and Building Materials*, 349, 128807.
- Guida, A., Pagliuca, A., Minerva, A.T.** (2011). The “SonReb” Method for Qualifying the Reinforced Concrete Structure, European Geosciences Union-General Assembly, Vienna, Austria.
- Guidebook on Non-destructive Testing of Concrete Structures** (2002). Training Course Series No.17, International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA-TCS-17, ISSN 1018-5518, Austria.

- Güneş, O.** (2019). *Sertleşmiş Betonun Basınç Dayanımı Tayininde Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Kombine Kullanımı Yoluyla Güvenilirliğinin Arttırılması* (Tübitak 1001 Projesi). Proje No: 214M054, İstanbul.
- Jedidi, M.** (2020). Evaluation of the Quality of Concrete Structures by the Rebound Hammer Method, *Current Trends in Civil&Structural Engineering*, Ris Publishers, ISSN: 2643-6876, DOI: 10.33552/CTCSE.2020.05.000621.
- İlhan, İ.** (2000). Beton (Schmidt) Çekici Ne İşe Yarar? TMH (Türkiye Mühendislik Haberleri), *Yapı Denetimi*, Sayı 410-2000/6.
- Kara, O., Erdal, H., Çelik, H.H.** (2017). Bazı Tahribatsız Test Yöntemleri: Karşılaştırmalı Bir Derleme Çalışması, *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, 3:82-93, DOI:10.7240/marufbd.326674.
- Kim, J.K., Kim, C.Y., Yi, S.T., Lee, Y.** (2009). Effect of Carbonation on the Rebound Number and Compressive Strength of Concrete, *Cement&Concrete Composites*, 31, 139-144.
- Kondalkar, R., Pitale, N.H., Dabhekar, K.R., Mase, D.P.** (2021). Structural Audit of An Old Building (A Case Study), International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE 2021), IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1197, 012054, doi:10.1088/1757-899X/1197/1/012054.
- Kouddane, B., Sbartaı, Z.M., Alwash, M., Ali-Benyahia, K., Elachachi, S.M., Lamdouar, N., Kenai, S.** (2022). Assessment of Concrete Strength Using the Combination of NDT-Review and Performance Analysis, *Applied Sciences*, 12 (23), 10.3390/app122312190. hal-03982594.
- Kumavat, H.R., Chandak, N.R., Patil, I.T.** (2021). Factors influencing the performance of rebound hammer used for non-destructive testing of concrete members: A review, *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00491.
- Ladefoged, J.** (2023). *Microstructures and Compressive Strength of Lake Ice in Sweden, A Structural Documentation and Compressive Strength Analysis of Lake Ice Cores from Uppsala, Using the SonReb Method* (MSc Thesis). Department of Earth Sciences, University of Gothenburg, Göteborg, Sweden.
- Malhotra, V.M., Carino, N.J.** (2004). Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition, ASTM International, CRC Press.
- Minutolo, V., Ronza, S.D., Eramo, C., Zona, R.** (2019). The Use of Destructive and non Destructive Testing in Concrete Strength Assessment for a School Building, *Preprints (www.preprints.org)*, not peer reviewed, posted: 13 June 2019, doi:10.20944/preprints201906.0121.v1.
- Nobile, L., Bonagura, M.** (2016). Parametric Regression Model and ANN (Artificial Neural Network) Approach in Predicting Concrete Compressive Strength by SonReb Method, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, Vol .5, No. 3, doi: 10.18178/ijscer.5.3.183-186.
- Oroza, A., Cuetara, R.** (2022). Evaluation of the compressive strength of a reinforced concrete structure using different SonReb estimation methods, *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, Vol. 37, No. 2, DOI: 10.7764/RIC.00031.21.
- Oroza, A.H., Ricardo, J.R.C.** (2023). Evaluation of SonReb Models for Estimating Compressive Strength in Cuban Cement and Aggregate Concrete, *Revista ALCONPAT*, Volume 13, Issue 1: 97-111, www.revistaalconpat.org, eISSN 2007-6835.

- Özbek, Ü., Canbaz, M.** (2018). *Kentsel Dönüşüm Kapsamında Eskişehir’de Bulunan Yapılardaki Beton Kalitesinin DeneySEL ve İstatistiksel Olarak İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Bilim Dalı.
- Özdoğan, D.B., Okuyucu, D.** (2018). *Schmidt Çekici Test Yönteminin Tarihi Yığma Yapılarda Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılmasının Araştırılması: Erzurum Kadana Camii Uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.
- Özhan, N.A., Büyüktaş, K.** (2018). *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesinde Bulunan Tarımsal Yapılardaki Yapı Elemanlarının Dayanımlarının Tahribatsız Yöntemle Belirlenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, Antalya.
- Panedpojaman, P., Tonnayopas, D.** (2018). Rebound Hammer Test to Estimate Compressive Strength of Heat Exposed Concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 172, Pages 387-395.
- Rashid, K., Waqas, R.** (2017). Compressive Strength Evaluation by Non-Destructive Techniques: An Automated Approach in Construction Industry, *Journal of Building Engineering*, 12, 147-154.
- Şan, F., Ulusu, İ.** (2022). *Erzincan Fırat Agregası Kullanılarak Üretilen Betonlarda Beton Test Çekici ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişkinin Araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzincan.
- Tanrıkulu, M.A., Turan, M.** (2010). *Tahribatsız Test Yöntemleri ile Beton Kalitesinin Denetimi* (Yüksek Lisans Tezi). Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Thapa, S., Sharma, R.P., Halder, L.** (2021). Developing SonReb Models to Predict the Compressive Strength of Concrete Using Different Percentage of Recycled Brick Aggregate, *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Tsioulou, O., Lampropoulos, A., Paschalis, S.** (2017). Combined Non-destructive Testing (NDT) Method for the Evaluation of the Mechanical Characteristics of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC), *Construction and Building Materials*, Volume 131, Pages 66-77.
- Yörübulut, S., Doğan, O.** (2019). *Betonun Basınç Dayanımının Tahribatsız Yöntem Verilerini Kullanarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Tahmin Edilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale.
- Yüksel, İ.** (2003). Bileşik Yıkıntısız Yöntemle Yerinde Beton Dayanımının Tahmini, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt: 9, Sayı: 2, 231-235.