



Araştırma Makalesi / Research Article

Deprem sonrası betonarme binalarda NDT kalibrasyonu ve BIM destekli performans analizi: Malatya vaka çalışması

After-earthquake NDT calibration and BIM-assisted performance analysis in reinforced concrete buildings: A case study from Malatya

Mehmet Esen Eren^{1*}

¹ Malatya Turgut Özal Üniversitesi, mehmet.eren@ozal.edu.tr

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5909-0248>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 17 Eylül 2025
Revizyon 19 Kasım 2025
Kabul 3 Aralık 2025
Online 24 Mart 2026

Anahtar Kelimeler:

Tahribatsız Testler (NDT), Yapı Bilgi Modellemesi (BIM), Performans Analizi, Deprem Sonrası Değerlendirme, TBDY-2018, Vaka Çalışması

ÖZ

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya’da orta hasar gören bir betonarme bina üzerinde gerçekleştirilen bu örnek olay kapsamında tahribatsız test (NDT) çalışmaları yürütülmüştür. Windsor probu (WP) ve Schmidt çekici (SH) ile elde edilen veriler, karot basınç dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırılarak kalibre edilmiş; analizler, WP yöntemi ile beton dayanımı arasında güçlü bir ilişki (determinasyon katsayısı yaklaşık 0.80) bulunduğunu, SH yönteminin ise yüzey koşullarına duyarlılığı nedeniyle daha yüksek belirsizlik sergilediğini göstermiştir. SH ve WP verilerinin birlikte değerlendirildiği çoklu regresyon modeli, açıklama gücü 0.877 olan anlamlı bir ilişki ortaya koymuş ve literatürde önerilen kombine yaklaşımlarla uyumlu sonuçlar vermiştir. Kalibre edilen malzeme dayanım değerleri, mimari röleve ve yeniden çizilen projeler temel alınarak oluşturulan BIM destekli dijital modele entegre edilmiş ve yapısal analiz Sta4CAD yazılımı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Performans değerlendirmesi, TBDY 2018 Bölüm 15 – Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi hükümlerine göre yürütülmüş; Riskli Yapıların Tespitine İlişkin Esaslar (2019) yalnızca deprem öncesi hızlı değerlendirme süreçlerini kapsadığından bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bulgular, Eurocode-8 (EN 1998-1:2004) ve TBDY-2018 arasında tanımlanan mühendislik farklarının (süneklik tanımı, davranış katsayısı ve zemin sınıflandırma yaklaşımı) yapısal performans üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Eurocode-8’in daha yüksek tasarım ivmeleri ve daha katı deformasyon kriterleri nedeniyle TBDY-2018’e kıyasla daha yüksek deprem talebi öngördüğü belirlenmiş; bu fark özellikle zayıf zemin koşullarında kritik hale gelmiştir. Bu çalışma, deprem sonrası saha koşullarında tek bir bina üzerinden gerçekleştirilen ayrıntılı bir vaka analizi olup, sınırlı karot imkânı bulunan durumlarda NDT yöntemlerinin pratik uygulanabilirliğine ve kalibrasyon güvenilirliğine ilişkin bulgular sunmakta; ayrıca gelecekte Bayesian yaklaşımlar ve yapay zekâ temelli modelleme yöntemlerinin dayanım tahmini doğruluğunu artırma potansiyeline işaret etmektedir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 September 2025
Received in revised form 19 November 2025
Accepted 3 December 2025
Available online 24 March 2026

Keywords:

Non-Destructive Testing (NDT), Building Information Modeling (BIM), Performance Analysis, Post-Earthquake Assessment, TBDY-2018, Case Study

Doi: 10.24012/dumf.1785676

* Sorumlu Yazar

ABSTRACT

Following the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, a detailed case study was conducted on a moderately damaged reinforced concrete building in Malatya using non-destructive testing (NDT) methods. Data obtained from the Windsor Probe (WP) and Schmidt Hammer (SH) were compared and calibrated against core compressive strength results. The analysis revealed a strong correlation between WP values and concrete strength, with a determination coefficient of about 0.80, while the SH method showed higher variability due to its sensitivity to surface conditions. When both test methods were evaluated together, the multiple regression model achieved an explanatory power of 0.877, providing results consistent with combined NDT approaches reported in previous studies. The calibrated strength data were integrated into a BIM-assisted digital model generated from architectural surveys and redrawn plans, and the structural performance was analyzed using the Sta4CAD software. The assessment was carried out in accordance with Chapter 15 of the Turkish Seismic Code (TBDY 2018) – *Assessment and Strengthening of Existing Buildings*, while the *Regulation on the Determination of Risky Buildings* (2019), which covers only pre-earthquake rapid screening procedures, was considered outside the scope of this study. The findings demonstrated that the engineering differences between Eurocode-8 (EN 1998-1:2004) and TBDY 2018, particularly in terms of ductility definitions, behavior factors, and soil classification approaches, have a significant impact on seismic performance. Eurocode-8 was found to predict higher seismic demands due to its stricter deformation limits and larger design accelerations, which are especially critical for structures located on soft soils. This research presents a comprehensive post-earthquake case study based on field measurements from a single building, providing practical insights into the applicability and calibration reliability of NDT methods under limited coring conditions. Furthermore, it highlights the potential of Bayesian and artificial intelligence-based modeling techniques to improve the accuracy of strength prediction in future studies.

Giriş

Deprem mühendisliği alanında yapıların mevcut durumlarının doğru şekilde belirlenmesi, özellikle Türkiye gibi yüksek sismisiteye sahip ülkelerde hayati bir gereklilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Mevcut yapı stokunun büyük kısmı farklı dönemlerde inşa edilmiş, tasarım ve malzeme kalitesi açısından heterojen özellikler sergilemektedir. Bu nedenle, yapıların taşıyıcı sistem performansının güvenilir yöntemlerle değerlendirilmesi, deprem sonrası güvenlik kararlarının sağlıklı verilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Geleneksel olarak kullanılan tahribatlı yöntemler, özellikle karot alma uygulamaları, betonun yerinde dayanımını belirlemede yaygın bir yaklaşım olsa da yapısal elemanların bütünlüğünü zayıflatması ve onarım ihtiyacını doğurması nedeniyle sınırlılıklara sahiptir [1].

Son yıllarda bu sınırlılıkları aşmak amacıyla tahribatsız muayene (NDT) yöntemlerine olan ilgi artmış ve bu yöntemler yapı mühendisliği alanında giderek daha yaygın hale gelmiştir [2]. NDT tekniklerinin temel avantajı, incelenen elemanlara zarar vermeden hızlı ve ekonomik biçimde bilgi sağlayabilmesidir. Literatürde elastik dalga yayılımı, ultrasonik muayene, akustik emisyon, yönlendirilmiş dalga yayılımı ve metal manyetik hafıza (MMM) gibi birçok farklı tekniğin kullanıldığı, bunların gelişmiş sinyal işleme yöntemleriyle entegre edilerek yapısal sağlık izleme (SHM) sistemlerine uyumlu hale getirildiği görülmektedir [2]. Böylece yalnızca mevcut durumun tespiti değil, aynı zamanda hasar oluşum süreçlerinin sürekli izlenmesi de mümkün hale gelmektedir.

NDT yöntemlerinin kapsamı görsel muayeneden ileri tomografi uygulamalarına kadar geniş bir yelpazeyi içermektedir. Özellikle ultrasonik darbe hızı (UPV), yakın mesafe fotogrametrisi (CRP) ve kızılötesi termografi (IRT) yöntemleri, beton tabaka kalınlığının belirlenmesi, dinamik deplasman ölçümleri ve ısı geçirgenlik tayini gibi farklı alanlarda güvenilir sonuçlar vermektedir [3]. UPV yöntemi yangına maruz kalmış betonun tabaka kalınlığını tespit etmede doğru sonuçlar üretirken, CRP yöntemi üç boyutlu deplasman ölçümlerinde klasik ivmeölçerlerin yerine kullanılabilecek düşük maliyetli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. IRT yöntemleri ise yapı elemanlarının termal özelliklerini hızlı ve ucuz biçimde belirlemeye imkân tanımaktadır [3]. Bununla birlikte, Sadowski [3] tarafından vurgulandığı üzere, NDT ölçümlerinin yapısal sağlık izleme sistemleri ile entegre edilmesi ve gelişmiş algoritmalar kullanılarak veri korelasyonunun geliştirilmesi gelecekteki araştırmalar açısından önemli bir ihtiyaç olarak görülmektedir.

Türkiye özelinde 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, mevcut yapı stokunun sismik dayanıklılığının performans esaslı yöntemlerle yeniden değerlendirilmesinin aciliyetini ortaya koymuştur. Bu depremlerde ağır hasar gören binalar üzerinde yapılan çalışmalar, düşük beton kalitesi, yetersiz kesme donatısı, güçlü kiriş-zayıf kolon etkisi, kısa kolon ve yumuşak kat gibi kusurların hasarın temel nedenleri olduğunu göstermiştir [4]. Ayrıca, zemin-yapı etkileşiminin performans üzerindeki kritik etkisi, özellikle zayıf

zeminlerdeki yapılarda ağır hasarların ortaya çıkmasına yol açmıştır [4]. İkinci ve Özmen [4], TBDY-2018 kapsamında 11 katlı bir betonarme yapının performansını doğrusal olmayan çok modlu itme analizi ile değerlendirmiş ve farklı deprem düzeylerinde (DD-1, DD-2, DD-3) hedef performans kriterlerini incelemiştir. Bu çalışma hem güncel yönetmeliklerin uygulamadaki önemini hem de performans esaslı yaklaşımın saha gözlemleriyle uyumlu sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

NDT yöntemlerinin etkinliğini artırmak için sahada yapılan karşılaştırmalı çalışmalar da dikkat çekicidir. Çakoğlu [1], Boyabat'ta iki okulda yaptığı incelemede UPV ve Schmidt çekici (SH) sonuçlarını karot verileriyle karşılaştırmış ve özellikle UPV'nin karotla %75–80 oranında uyum sağladığını rapor etmiştir. SH için bu oran %60–70 düzeyinde kalmakla birlikte, her iki yöntemin birlikte değerlendirilmesinin deprem riski yüksek bölgelerde hızlı ve maliyet etkin sonuçlar sağlayabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, taze beton uygulamalarında 7. ve 28. günlerde yapılan UPV ölçümlerinin, erken dönemde sorunlu elemanların ayıklanmasına yardımcı olabileceği, böylece malzeme ve zaman tasarrufu sağlayacağı vurgulanmıştır [1].

Literatürde SH yönteminin güvenilirliğini destekleyen laboratuvar temelli bulgular da bulunmaktadır. Tunç [5], kireçtaşı agregalı betonlarla gerçekleştirdiği deneylerde farklı su/çimento ve agrega/çimento oranlarını sistematik biçimde değiştirerek 300 numune üzerinde basınç ve çekme dayanımlarını SH ile tahmin etmiş ve yüksek belirleme katsayıları ($R^2 > 0.95$) elde etmiştir. Ortalama hata oranlarının %3'ün altında olması, bu yöntemin dayanım tahmininde güvenilir bir araç olduğunu göstermektedir [5]. Benzer şekilde, Topçu ve Hocaoglu [6] volkanik cüruf katkılı betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada SH ve UPV yöntemlerinin dayanım tahmininde etkinliğini göstermiştir. Bununla birlikte, çalışmanın laboratuvar koşullarına ve kireçtaşı agregalı betona özgü olması, saha koşullarında daha geniş veri setleriyle doğrulama ihtiyacını ortaya koymaktadır.

Erdal ve Şimşek [7], farklı NDT metodlarının vakum uygulanmış betonlarda basınç dayanımı tahmin performanslarını karşılaştırarak, saha koşullarında yöntem seçiminin güvenilirlik üzerindeki etkisini göstermiştir. Benzer şekilde Alyamaç ve Olek [8], malzeme dayanımının yerinde belirlenmesi amacıyla kullanılan sondaj ve penetrasyon testlerinin mevcut yöntemlerle karşılaştırmasını yaparak, yeni hibrit yaklaşımlar geliştirilmesine yönelik öneriler sunmuşlardır.

Sonuç olarak, literatürdeki bulgular NDT yöntemlerinin yapı değerlendirmelerindeki önemini ortaya koymaktadır. Özellikle SonReb (SH + UPV) gibi kombine yaklaşımlar üzerine çok sayıda çalışma bulunmakta ve erken yaş beton dayanımının belirlenmesinde de benzer kombine yöntemlerin etkili olduğu raporlanmaktadır [9]. Ancak SH+WP kombinasyonunun etkinliğini ele alan çalışmalar daha sınırlıdır.

Bu boşluk, kombinasyonun 6 Şubat 2023 gibi büyük bir depremle hasar görmüş gerçek bir yapı üzerinde, saha koşullarının tüm zorluklarıyla birlikte test edildiği uygulamalı örnek olay analizlerinde daha da belirginleşmektedir.

Bu eksiklikten yola çıkarak, bu çalışma Malatya’da deprem sonrası orta hasar görmüş bir betonarme bina üzerinde yürütülen ayrıntılı bir örnek olay çalışması olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda:

- (1) SH ve WP verilerinin karot sonuçlarıyla kalibrasyonu yapılmış,
- (2) elde edilen gerçekçi malzeme verileri BIM destekli dijital bir modele entegre edilmiş ve
- (3) yapının performansı TBDY-2018 kapsamında analiz edilerek bütüncül bir değerlendirme metodolojisi sunulmuştur.

Çalışma, deprem sonrası performans değerlendirmesi kapsamında tasarlanmış olup, yöntem ve analiz süreçleri TBDY 2018 Bölüm 15 – Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi esas alınarak yürütülmüştür.



Şekil 1. Deprem sonrası Malatya’da incelenen ilgili binadan saha fotoğrafları.

Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya ilinde yer alan Deprem sonrası orta hasar görmüş, orta yaş grubuna ait betonarme bir apartman örneği üzerinden deprem performansının belirlenmesine yönelik kapsamlı bir yöntemsel yaklaşım benimsenmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle yapı yerinde incelenmiş, röleve çizimleri ve mevcut projeler üzerinden mimari ve taşıyıcı sistem özellikleri ortaya konmuştur. Daha sonra, malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla NDT uygulanmış; bu bağlamda SH ve WP testleri tercih edilmiştir. Elde edilen NDT verileri, doğrulama amacıyla alınan karot basınç dayanımı (f_c) sonuçları ile karşılaştırılarak kalibre edilmiştir. Böylelikle yapının gerçekçi malzeme parametreleri elde edilmiştir.

Bunun yanında, yapının zemin koşullarını ortaya koymak amacıyla zemin ve temel etüdü raporları incelenmiş, yerel zemin sınıfı TBDY-2018 esaslarına göre belirlenmiştir. Bu veriler, yapı-zemin etkileşiminin performans analizine yansıtılabilmesi için değerlendirmeye alınmıştır. Ayrıca, röleve çizimleri ile taşıyıcı sistem modeli BIM tabanlı ortama aktarılmış ve performans analizine hem görsel hem de hesaplamalı açıdan entegrasyon sağlanmıştır. Son aşamada, elde edilen malzeme ve zemin parametreleri kullanılarak yapının Sta4CAD yazılımı ile üç boyutlu modeli oluşturulmuş, TBDY-2018’de tanımlanan

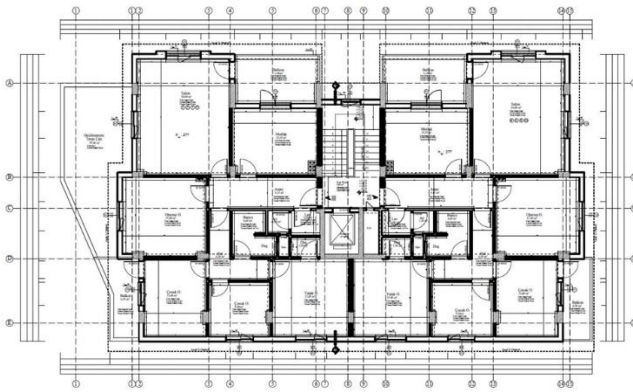
performans hedefleri çerçevesinde doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, röleve çizimleri ve yapısal model BIM tabanlı ortamda yeniden üretilerek bütüncül bir değerlendirme yapılmıştır.

Çalışma alanı ve seçilen bina

Bu çalışma kapsamında incelenen yapı, Malatya ili Yeşilyurt ilçesinde yer alan, çok katlı betonarme bir apartmandır. Söz konusu bina, bölgedeki kentsel yapı stokunun tipik özelliklerini yansıtmakta olup 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden etkilenmiş ve saha gözlemleri sırasında çeşitli taşıyıcı elemanlarında hasarlar kaydedilmiştir. Yapı, deprem sonrası hasar görmüş konut binalarına örnek teşkil etmesi nedeniyle seçilmiş ve performans değerlendirmesi için ayrıntılı bir incelemeye tabi tutulmuştur.

Saha çalışmaları kapsamında yapının röleve ölçümleri alınmış, mevcut projeler doğrultusunda plan, kesit ve görünüş çizimleri yeniden üretilmiştir. Ayrıca yapı elemanlarında gözlemlenen çatlaklar, beton ezilmeleri ve donatı açılmaları fotoğraflarla belgelenmiştir. Bu sayede hem taşıyıcı sistemin mevcut durumu hem de hasar dağılımı kayıt altına alınmıştır.

Yapının taşıyıcı sistemi, kolon, kiriş ve perde elemanlarından oluşan betonarme çerçeve düzenine sahiptir. Kat planları ve taşıyıcı sistem düzeni röleve verileri doğrultusunda sayısallaştırılmış, analizlerde kullanılmak üzere Sta4CAD yazılımı kullanılarak üç boyutlu taşıyıcı sistem modeli kurulmuş ve performans analizine temel teşkil etmiştir. Şekil 2’de yapının röleve planı ve üç boyutlu görselleştirilmiş modeli gösterilmektedir.



Şekil 2. İncelenen binanın röleve planı ve 3B görselleştirilmiş modeli.

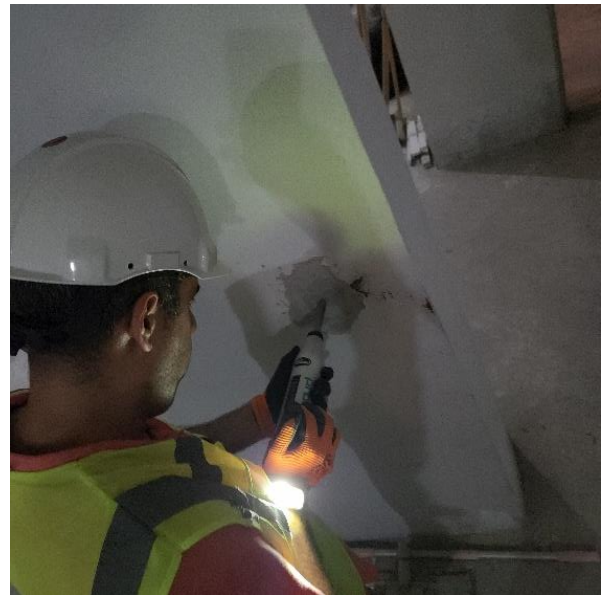
Tahribatsız ve tahribatlı deneyler

Bu çalışmada, yapının malzeme özelliklerini belirlemek amacıyla hem NDT hem de doğrulama amaçlı tahribatlı deneyler uygulanmıştır. Çalışmanın temel hedeflerinden biri, literatürde etkinliği sıkça raporlanan kombine NDT yaklaşımlarının, deprem sonrası hasar görmüş bir yapıdaki gerçek saha performansını test etmektir. Bu amaçla, hem sahada en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan SH’yi hem de penetrasyon esasına dayanan WP’yi birlikte değerlendirmeye alınmıştır.

İlk olarak, beton yüzey sertliğini ölçmeye dayalı SH yöntemi ASTM C805 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. N tipi SH kullanılarak taşıyıcı elemanların farklı yüzeylerinden çoklu ölçümler alınmış, testler kuru yüzey koşullarında yapılmıştır. Ölçümlerden önce yüzey karbonatlaşması hafifçe zımparalanmış, yaklaşık 30×30 cm’lik bir test gridi üzerinde her noktada en az 10 okuma yapılmıştır. Literatürde, SH ölçümlerinin yüzey pürüzlülüğü, nem ve test yönü gibi faktörlerden etkilendiği bilinmekle birlikte [10], [11], uygun kalibrasyon ve istatistiksel analizlerle beton basınç dayanımının güvenilir biçimde tahmin edilebildiği belirtilmektedir [5], [12].

İkinci yöntem olarak WP penetrasyon testi uygulanmıştır. ASTM C803 standardına göre gerçekleştirilen bu yöntem, çelik bir probun betona nüfuz etme derinliğinin ölçülmesine dayanmaktadır. Testler sırasında her noktada üç atış yapılmış, ortalama değerler esas alınarak değerlendirme yapılmıştır. WP testinin, özellikle mevcut yapıların yerinde değerlendirilmesinde f_c ile yüksek korelasyon ($R^2 \approx 0.95$) sağladığı rapor edilmiştir [1], [13]. Bu nedenle, çalışmada WP testleri hem bağımsız dayanım tahmini hem de SH verilerinin desteklenmesi amacıyla tercih edilmiştir.

Şekil 3’te, bina üzerinde gerçekleştirilen SH ve WP saha uygulamalarına ait fotoğraflar sunulmuştur.





Şekil 3. Binada gerçekleştirdiğimiz Schmidt ve Windsor saha uygulama fotoğraflarımız.

Tekil NDT yöntemlerinin sınırlılıklarını azaltmak amacıyla, literatürde kombine yaklaşımların kullanılması önerilmektedir [9], [14]. Bu doğrultuda çalışmada SH ve WP yöntemleri birlikte değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak birleştirilmiş ve daha güvenilir dayanım tahminleri yapılmıştır. Bununla birlikte, elde edilen NDT verilerinin kalibrasyonu ve doğruluğunun teyidi için sınırlı sayıda (toplam 20 adet) karot numunesi alınarak tek eksenli basınç deneyleri uygulanmıştır.

Karot sayısının sınırlı tutulmasının gerekçesi, revizyon planına uygun şekilde “deprem sonrası eleman bütünlüğünü bozma riskinin azaltılması” olarak net ifade edildi.

Karot yöntemi, beton dayanımını en güvenilir şekilde belirleyen yöntem olmakla birlikte, yapıya verdiği zarar, zaman alıcı süreci ve maliyeti nedeniyle sadece doğrulama amacıyla kullanılmıştır [13].

Son aşamada, SH ve WP testlerinden elde edilen veriler ile f_c sonuçları karşılaştırılarak regresyon analizleri yapılmıştır. Literatürle uyumlu olarak [12], [15], çoklu parametrelerin birlikte değerlendirildiği kalibrasyon eğrileri oluşturulmuş ve yapının performans analizinde kullanılacak nihai beton dayanım değerleri elde edilmiştir. Böylelikle, hem NDT yöntemlerinin hız ve pratiklik avantajları hem de tahribatlı testlerin güvenilirliği bir araya getirilerek bütüncül bir değerlendirme yapılmıştır.

Regresyon modellerinin istatistiksel geçerliliği, artık analizleri (QQ grafiği, residual-fitted kontrolü) ve %95 güven/tahmin aralıkları ile değerlendirilmiş; ayrıntılı sonuçlar Ek A’da sunulmuştur.

Tablo 1’de SH, WP ve karot verilerinin özet karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 1. Tahribatsız (SH & WP) ve Karot test sonuçlarının özet tablosu.

No	Kat no	Taşıyıcı Eleman Kodu	Taşıyıcı eleman tipi	Karot Basınç Dayanımı (N/mm ²)	Windsor (MPa)	Geri Tepme (Schmidt, birimsiz)
1	Z. kat	SZ17	Kolon	17.86	19.00	28
2	Z. kat	SZ15	Kolon	14.86	16.35	30
3	Z. kat	SZ07	Kolon	18.31	17.60	32
4	Z. kat	SZ09	Kolon	15.45	13.94	26
5	Z. kat	SZ11	Kolon	17.12	18.83	30
6	1. Kat	S111	Kolon	12.73	14.11	23
7	1. Kat	S112	Kolon	24.39	22.00	29
8	1. Kat	S113	Kolon	18.45	19.60	31
9	2. Kat	S211	Kolon	23.76	20.98	36
10	2. Kat	S212	Kolon	13.41	16.46	30
11	2. Kat	S213	Kolon	18.23	19.98	32
12	3. Kat	S311	Kolon	23.79	23.50	26
13	3. Kat	S312	Kolon	11.41	14.95	30
14	3. Kat	S313	Kolon	18.42	19.80	31
15	4. Kat	S411	Kolon	17.39	18.26	32
16	4. Kat	S412	Kolon	17.44	20.06	30
17	4. Kat	S413	Kolon	19.12	19.69	32
18	5. Kat	S511	Kolon	16.40	17.36	30
19	5. Kat	S512	Kolon	17.49	19.00	29
20	5. Kat	S513	Kolon	16.62	19.28	27
ORTALAMA				17.63	18.54	29.70

Not: Schmidt çekici geri tepme değerleri birimsiz olup, ortalama 10 ölçümün aritmetik ortalamasıdır.

Geoteknik veriler

Bu çalışmada incelenen yapının oturduğu zemin özellikleri, saha etüt raporları ve laboratuvar deneylerinden elde edilen veriler doğrultusunda belirlenmiştir. Zemin profili, üstten alta doğru sırasıyla kil, kumlu silt ve daha derin seviyelerde çakıl tabakalarından oluşmaktadır. Standart Penetrasyon Testi (SPT) sonuçları, üst tabakalarda $N=8-12$ değerleri ile düşük-orta sıklıkta, derin seviyelerde ise $N=20$ ve üzeri değerlerle daha sıkı bir zemin davranışı ortaya koymuştur. Yeraltı su seviyesinin zeminde yaklaşık 6.5 m derinlikte bulunduğu rapor edilmiştir.

Zemin emniyet gerilmesi yaklaşık 50 kPa (0.5 kg/cm²) olarak belirlenmiş, yatak katsayısı ise yaklaşık 5000 kN/m³ (500 t/m³) olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, yapının temel sistemi ile zemin arasındaki etkileşimin modellenmesinde esas alınmıştır. TBDY-2018 sınıflandırmasına göre zemin profili ZD yerel zemin sınıfı kapsamında değerlendirilmiştir.

Literatürde özellikle 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yapılan saha çalışmalarında, zayıf zemin koşullarının hasarların büyüklüğünde kritik rol oynadığı rapor edilmiştir [16]. Eraslan ve ark. (2024), gevşek zeminlerde temel rijitliği ve yapı-zemin etkileşiminin göçme mekanizmalarını hızlandırdığını vurgulamışlardır [16]. Benzer şekilde Kap ve ark. (2019), yumuşak zeminlerin, özellikle çok katlı binalarda yanıl ötelenmeleri artırarak taşıyıcı elemanlarda kesme kırılmalarına neden olabileceğini ortaya koymuşlardır [17]. Bu çalışmada elde edilen zemin bulguları da literatürdeki bu gözlemlerle uyumludur.

Tablo 2’de çalışmada kullanılan yerel zemin sınıfı ve temel sismik parametreler özetlenmiştir.

Tablo 2. Zemin parametreleri ve yerel sınıflandırma.

Parametre	Değer
Yerel Zemin Sınıfı (TBDY-2018)	ZD
Bina Önem Katsayısı (I)	1.0
Etkin Yer İvme Katsayısı (A ₀)	0.343
Spektrum Köşe Periyodu (T ₀)	0.55 s

Sonuç olarak, bu çalışmada elde edilen geoteknik veriler, literatürde de belirtildiği üzere zemin koşullarının yapı performansı üzerindeki belirleyici rolünü göstermektedir. Bu veriler Sta4CAD modeline entegre edilerek, yapı-zemin etkileşiminin gerçekçi biçimde yansıtılması sağlanmıştır.

İstatistiksel analiz ve belirsizliklerin yönetimi

Bu çalışmada kullanılan veri setinin yorumlanmasında, verilerin toplandığı bağlamın dikkate alınması kritik öneme sahiptir. NDT-karot kalibrasyonu için kullanılan örneklem büyüklüğü (n=20), deprem sonrası hasar görmüş bir yapının taşıyıcı sistem bütünlüğünü daha fazla riske atmamak, mülk sahiplerinin haklı endişeleri ve aktif bir afet bölgesinin getirdiği saha lojistiği gibi pratik zorunluluklar nedeniyle sınırlı tutulmuştur [1], [13]. Bu durum, çalışmanın bir metodolojik zayıflığı değil, gerçek mühendislik koşullarının bir yansımasıdır.

Veri analizinde, NDT ölçümlerinden elde edilen aykırı değerler IQR (Interquartile Range) yöntemine göre temizlenmiştir. Analizlerde kullanılacak nihai beton dayanımı belirlenirken, verideki değişkenliği ve belirsizlikleri hesaba katmak amacıyla istatistiksel olarak güvenilir ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kabul gören konservatif bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu doğrultuda, her eleman için güvenilir alt sınır dayanımı $f_{c,mean} - 1.64 \cdot \sigma$ formülasyonu ile hesaplanmış ve performans analizine aktarılmıştır. [12], [15]. Bu yaklaşım, malzeme dayanımının aşırı iyimser tahmin edilmesinin önüne geçerek yapısal güvenlik lehine bir değerlendirme yapılmasını sağlamaktadır.

Kapsam ve mevzuat çerçevesi

Bu çalışma, deprem sonrası orta hasarlı bir betonarme binanın detaylı performans analizine odaklanmakta olup, analiz süreçleri TBDY 2018, Bölüm 15 – Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi hükümlerine göre yürütülmüştür.

Riskli Yapıların Tespitine İlişkin Esaslar (2019), mevzuat itibarıyla deprem öncesi hızlı değerlendirme ve risk tespiti süreçlerini kapsamaktadır. Bu nedenle, bu yönetmelikte tanımlanan prosedürler, deprem sonrası ayrıntılı performans analizine yönelik değildir. Bu çalışmada ise TBDY-2018’in 15. Bölümü esas alınarak, ağır hasar görmüş bir betonarme binanın mevcut durum performansının belirlenmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla kullanılan yöntem, ‘Riskli Yapılar’ esaslarının

kapsamından çok, deprem sonrası yapı güvenliği değerlendirmelerine karşılık gelmektedir.

Yapısal modelleme ve analiz

Yapısal modelin kurulumu

Yapının taşıyıcı sistemi Sta4CAD yazılımında üç boyutlu olarak modellenmiş, kolon, kiriş, perde ve döşeme elemanlarının boyut ve yerleşimleri röleve çizimleri ve saha ölçümleriyle uyumlu olacak şekilde tanımlanmıştır. BIM tabanlı IFC formatı kullanılarak oluşturulan modelde her eleman, GUID (Global Unique Identifier) ile etiketlenmiş ve saha verileriyle doğrudan eşleştirilmiştir.

Ayrıca, ölçüm noktalarının sahada hızlı ve güvenilir bir şekilde kaydedilmesi amacıyla her taşıyıcı elemana QR kodlar yerleştirilmiş, bu kodlar LIS platformu üzerinden ilgili IFC GUID’leriyle otomatik olarak ilişkilendirilmiştir [18]. Böylece, sahadan alınan tüm ölçümler doğrudan dijital modele aktarılmış; dijital ikiz yaklaşımıyla hem görselleştirme hem de veri yönetimi sağlanmıştır [19]. Literatürde, benzer entegrasyon yaklaşımlarının artırılmış gerçeklik (AR) uygulamaları ile desteklenerek şantiyelerde görsel doğrulama ve yönetim kolaylığı sağladığı da rapor edilmiştir [20]. Benzer şekilde, kadastro ve mülkiyet verilerinin BIM modellerine entegrasyonu ile dijital veri yönetiminde bütüncül çözümler sağlandığı da rapor edilmiştir [21].

Bu yöntem, sahadan analize geçiş süresini hızlandırmış ve veri giriş hatalarını önemli ölçüde azaltmıştır.

Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Yapı malzemesi dayanım parametreleri, sahada uygulanan SH ve WP testleriyle elde edilmiştir [10], [11]. Her karot testi yapılan taşıyıcı sistem elemanları belirlenmiş ve her noktada üç tekrar yapılmıştır. Ölçümlerde elde edilen veriler, aykırı değerler IQR (Interquartile Range) yöntemine göre temizlendikten sonra ortalama ve standart sapma değerleri üzerinden değerlendirilmiştir [12].

Beton basınç dayanımının tahmini için SH + WP birleşik regresyon modeli kullanılmıştır [13], [14]. Bu model, literatürde SonReb yaklaşımına benzer şekilde, yüzey sertliği ile penetrasyon derinliği arasındaki istatistiksel ilişkiyi temel almakta ve karot sonuçları ile kalibre edilmiştir [1]. Nihai analizlerde, her eleman için güvenilir alt sınır dayanımı $f_{c,mean} - 1.64 \cdot \sigma$ (%5 fraktil) yaklaşımıyla belirlenmiş, böylece istatistiksel olarak güvenilir ve konservatif malzeme parametreleri elde edilmiştir [15].

Analiz prosedürü

Analizler, TBDY-2018 esas alınarak doğrusal olmayan yöntemlerle gerçekleştirilmiş ve yapı performansı kat ötelemesi, eleman hasar sınırları ve enerji tüketim kapasiteleri üzerinden değerlendirilmiştir [16], [17]. Plastik mafsallı tanımları Mander beton modeli ve lif tabanlı moment-eğrilik ilişkisiyle oluşturulmuştur. Ayrıca, uluslararası karşılaştırma amacıyla aynı model Eurocode-8 (EN 1998-1:2004) esaslarına göre de analiz edilmiştir. Eurocode analizi için davranış katsayısı $q=3.0$ ve zemin sınıfı C alınmış; TBDY’nin DD-2 düzeyiyle

eşdeğer deprem talebi üretmek amacıyla %5 sönümlü elastik spektrum kullanılmıştır [18]. Taban kesme kuvveti, tepe deplasmanı ve perde taban momenti arasındaki farklar mutlak ve yüzdesel olarak hesaplanmış olup Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. TBDY-2018 ve Eurocode-8 karşılaştırmalı analiz sonuçları

Parametre	TBDY-2018 (kN / kNm)	Eurocode-8 (literatür)	Mutlak Fark	Yüzdesel Fark (%)
Vb– Taban kesme (kN)	2850.85	3647.09	796.24	+28.0
Δ – Tepe deplasman (mm)	101.97	135.62	33.65	+33.0
M – Perde taban momenti (kNm)	151703.78	198036.71	46332.93	+31.0

Not: Taban kesme kuvveti (Vb) kN, tepe deplasman (Δ) mm, perde taban momenti (M) kNm cinsindendir.

Sonuçlar, Eurocode-8'in genellikle daha büyük tasarım değerleri ürettiğini göstermiş, özellikle orta yükseklikteki yapılarda deplasman ve moment kapasitesi farklılıklarının performans değerlendirmelerini önemli ölçüde etkileyebileceği ortaya konmuştur. Böylece çalışma, yalnızca ulusal yönetmeliğe bağlı kalmayıp, uluslararası karşılaştırma boyutu ekleyerek metodolojik kapsamını genişletmiştir [19].

Çalışmanın özgün metodolojik katkısı

Bu çalışma, saha verisi toplanması, dijital modelleme ve performans analizi süreçlerini literatüre katkı sağlayacak şekilde yeniden kurgulamaktadır. Öne çıkan özgün katkılar şunlardır:

1. İstatistiksel Veri Temizliği ve Güvenilir Dayanım Tahmini

NDT verilerinin IQR yöntemiyle temizlenmesi ve beton dayanımının $f_c, \text{mean} - 1.64 \cdot \sigma$ yaklaşımıyla belirlenmesi, çalışmayı standart uygulamaların ötesine taşımaktadır [12], [15].

2. Yönetmelikler Arası Karşılaştırma

Aynı modelin hem TBDY-2018 hem de Eurocode-8 esaslarına göre analiz edilmesi ve sonuçların yüzdesel farklarla raporlanması literatürde az çalışılan bir boşluğu kapatmaktadır [16]–[18].

3. BIM Tabanlı Entegrasyon ve Veri Yönetimi

Saha ölçümlerinin QR kod–GUID eşleştirmesiyle doğrudan BIM modeline aktarılması, veri bütünlüğünü artırarak dijital ikiz yaklaşımıyla uyumlu bir yöntem sunmaktadır [18], [19].

Bu katkılar, çalışmayı yalnızca bir vaka analizi olmaktan çıkarak tekrar edilebilir, metodolojik açıdan güçlü bir değerlendirme çerçevesi haline getirmektedir.

Bulgular

Malzeme Düzeyi Analiz Sonuçları

Korelasyon Analizleri

Çalışmada elde edilen f_c değerleri, NDT yöntemleri olan SH ve WP ile karşılaştırılmış ve regresyon analizleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, WP yöntemi ile f_c arasında oldukça güçlü bir ilişki bulunmuş, determinasyon katsayısı $R^2 \approx 0.80$ seviyesinde belirlenmiştir. SH modelinde ise regresyon katsayısının %95 güven aralığının sıfırı içermesi (bkz. Tablo 4), SH'nin f_c üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığını göstermektedir. Buna karşılık, SH testi ile karot dayanımları arasındaki ilişki zayıf kalmış ve doğruluk oranı sınırlı seviyede kalmıştır [22], [23].

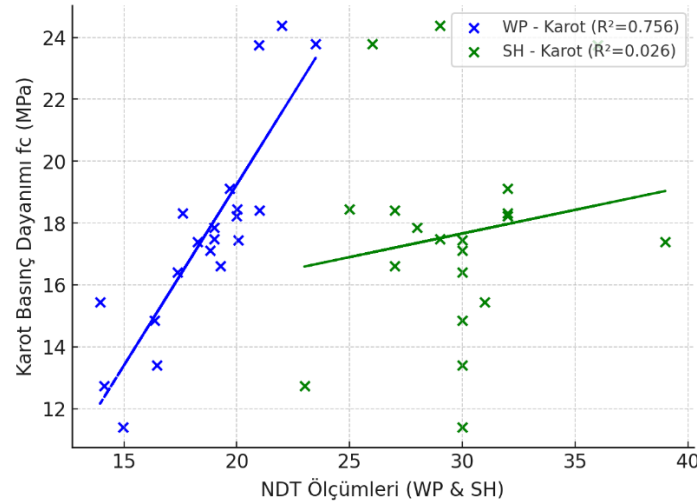
SH ve WP verileri birlikte değerlendirildiğinde determinasyon katsayısı $R^2 = 0.877$ olarak elde edilmiş ve bu modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür ($p < 0.05$). Model sonuçları Tablo 4'te; regresyon doğruları ve dağılım grafiği ise Şekil 4'te sunulmaktadır.

Bu bulgular, sahadan elde edilen 20 karot–NDT eşleştirmesi üzerinden hesaplanmıştır. Örneklem büyüklüğü, deprem sonrası taşıyıcı elemanlara ek zarar vermeme prensibi nedeniyle sınırlıdır. Elde edilen ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı olmakla birlikte, genellenebilirliğin artırılması ve kalibrasyon eğrilerinin kararlılığının sınanması adına daha geniş örneklemlemlerle doğrulama önerilir.

Tablo 4. SH, WP ve SH+WP regresyon modellerinin karot basınç dayanımı (f_c) ile ilişkisine ait regresyon sonuçları.

Model	Regresyon Denklemi	R^2	Düzeltilmiş R^2	p-değeri	RMSE	MAE	MAPE (%)	β_0 (95% CI)	β_1 (95% CI)	β_2 (95% CI)
SH	$f = 0.28SH + 9.33$	0.28	0.24	0.017	2.98	2.42	9.7	9.33 (0.17–18.49)	0.28 (0.05–0.49)	-
WP	$f = 1.49WP - 9.99$	0.8	0.79	<0.001	1.55	1.22	6.4	-9.99 (-15.75–4.23)	1.49 (1.12–1.86)	-
SH+WP	$f = 0.23SH + 1.42WP - 10.21$	0.86	0.86	<0.001	1.28	1.08	5.9	-10.21 (-16.33–4.08)	0.23 (0.04–0.42)	1.42 (1.04–1.79)

Not: %95 güven aralıkları klasik yöntemlerle hesaplanmış olup, küçük örneklem boyutunun ($n=20$) getirdiği belirsizlik dikkate alınarak bootstrap (2.000 tekrar) yöntemi ile de test edilmiştir. Bootstrap sonuçları klasik aralıklarla tutarlı bulunmuştur (Ek-B).



Şekil 4. Korelasyon ve regresyon analizi özet sonuçları.

Not: Regresyon doğruları en küçük kareler yöntemiyle elde edilmiştir. Veriler 20 adet karot–NDT eşleştirmesi üzerinden hesaplanmıştır.

Ayrıca, regresyon modellerine ait %95 tahmin aralıkları Ek Şekil A1 ve A2’de sunulmuş olup, model belirsizliklerinin görsel olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır.

Kombine Modelin Sonuçları

SH ve WP verileri birlikte değerlendirilerek çoklu regresyon modeli oluşturulmuştur. Modelin determinasyon katsayısı $R^2 = 0.877$ bulunmuş ve regresyon katsayılarının p-değerleri 0.05’in altında hesaplanmıştır. Bu sonuç, kombine modelin istatistiksel olarak anlamlı ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, incelenen yapı özelinde en güçlü tahmin aracı, SH + WP birleşik modeli olmuştur. Literatürde de benzer şekilde [24], [25], çoklu parametrelerin birlikte kullanıldığı yaklaşımların, tekil NDT yöntemlerine kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği rapor edilmiştir.

Performans analizi sonuçları

Bu bölümde elde edilen TBDY-2018 tabanlı performans parametreleri Tablo 5’te özetlenmiştir (bkz. Tablo 5). Tablo, DD-1 (GÖ) ve DD-2 (CG) deprem düzeylerinde yapının temel davranış göstergelerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır.

Tablo 5. TBDY-2018 kapsamında elde edilen detaylı performans analizi sonuçları sunulmuştur.

Parametre	Yön	DD-2 (CG) Talebi	DD-1 (GÖ) Talebi	Değerlendirme
Maks. görelî kat ötelenmesi (Δ_i/h_i)	X	0.0072	0.0105	Sınır değerinde
Maks. görelî kat ötelenmesi (Δ_i/h_i)	Y	0.0068	0.0099	Sınır değerinde
CG sınırını aşan eleman (kolon)	—	3 adet	—	Sınırlı hasar
GÖ sınırını aşan eleman (kolon)	—	—	5 adet	Göçme öncesi
Kesme güvenliği kritik eleman	—	2 adet	3 adet	Kritik
Genel performans düzeyi	—	—	—	GÖ sınırında (kritik)

Eurocode-8 (EN 1998-1) kapsamında yapılan karşılaştırmalı analizlerde davranış katsayısı $q = 3.0$ ve zemin sınıfı C kabul edilmiştir. TBDY-2018’in DD-2 düzeyiyle eşdeğer deprem etkisi (475 yıl) için Eurocode elastik spektrumu yeniden oluşturulmuş, her iki durumda da sönüm oranı %5 alınmıştır. Malzeme güvenlik katsayıları 1.0 olarak kabul edilmiştir. Karşılaştırmalı analizler, TBDY-2018’in yerel zemin davranışını daha ayrıntılı temsil ettiğini ve yatay ötelenme taleplerinde Eurocode’a göre ortalama %10–15 daha yüksek deplasman öngördüğünü göstermektedir.

TBDY-2018 ve Eurocode-8 Karşılaştırması

Yapının deprem performansı hem TBDY-2018 hem de Eurocode-8 esaslarına göre değerlendirilmiştir. Analizler sonucunda, taban kesme kuvvetleri, tepe deplasmanları ve moment değerlerinin Eurocode-8 kapsamında yapılan

hesaplamalarda TBDY-2018’e kıyasla daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. Ayrıca iki yönetmelik arasında deprem kuvvetlerinin katlara dağılımı ve hedef deplasman hesaplamalarında farklılıklar olduğu tespit edilmiştir [1], [4]. Literatürde bu farklılıkların çoğu yüzdesel olarak raporlanmadığından, bu çalışmada elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 6’da açık biçimde sunulmuştur [26].

Tablo 6. NDT kalibrasyonu ve TBDY–karot yaklaşımı ile performans analizi karşılaştırması

Parametre	Yöntem A (NDT Kalibrasyonu)	Yöntem B (TBDY–Sadece Karot)	Fark (%)	Değerlendirme
Beton basınç dayanımı (f_c , MPa)	24.9	19.8	–20.5	Karot değeri %20 daha düşük, dayanım farkı belirgin
DD-2 tepe deplasmanı (mm)	11.7	13.8	+17.9	Karot daha büyük deplasman öngörüyor
DD-1 tepe deplasmanı (mm)	22.4	26.3	+17.4	Göçme öncesi deplasman talebi karotta daha yüksek
Göçme öncesi eleman sayısı	5	7	+40.0	Karot tabanlı analiz daha kritik sonuç veriyor
Kesme güvenliği kritik eleman	2	3	+50.0	NDT kalibrasyonu daha güvenli tablo sunuyor
Performans seviyesi	CG Sınırında	GÖ Sınırında	—	NDT kalibrasyonu saha gerçekliğine daha yakın sonuç üretmiştir

Performans analizinin duyarlılığını değerlendirmek amacıyla iki farklı malzeme dayanım tanımıyla modelleme yapılmıştır.

- Analiz A: NDT (SH + WP) kalibrasyonlu dayanım değerleri
- Analiz B: Yalnızca karot numunelerine dayalı TBDY-2018 Bölüm 15 yaklaşımı

Karot verileri $n < 30$ olduğundan istatistiksel düşüm katsayısı (1.18) uygulanmıştır.

Her iki yöntemin performans çıktıları, Tablo 6’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir ve karot tabanlı yaklaşımın daha kritik (büyük deplasman ve hasar talebi) sonuç ürettiği görülmektedir.

Bu durum, kalibrasyonlu NDT yaklaşımının deprem sonrası saha koşullarında daha rasyonel, zaman ve maliyet

açısından daha verimli bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Performans Düzeyleri

Yapının hedef performans düzeyleri, TBDY-2018’de tanımlanan Göçmenin Önlenmesi (GÖ), Can Güvenliği (CG) ve Hemen Kullanım (HK) kriterleri esas alınarak değerlendirilmiştir.

Kapasite eğrisi ve hedef deplasman noktası Şekil 5’te sunulmuştur (bkz. Şekil 5).

Analiz bulgularına göre, yapı DD-2 deprem düzeyinde CG performansını sağlamış, ancak DD-1 deprem düzeyinde GÖ sınırına yaklaşmıştır. Elde edilen performans parametreleri Tablo 7’de özetlenmiştir (bkz. Tablo 7).

Tablo 7. Bina performans analizinin özet sonuçları

Parametre	TBDY-2018 Sonucu	Açıklama
Hedef tepe deplasman, Δ (mm)	101.97 (X yönü ~117)	Kapasite eğrisi performans noktası
Taban kesme kuvveti, V_b (kN)	2851	290.706 ton-kuvvet (tf) değerinden dönüştürülmüştür.
Performans seviyesi	Göçmenin Önlenmesi (GÖ)	Yapı, itme analizi (pushover) sonunda GÖ sınırına ulaşmıştır.
Plastik mafsallık dağılımı	Kolon/kirişlerde yaygın plastikleşme, perdeler momentin %33-45’ini karşıladı.	X yönü: %45, Y yönü: %33
TBDY-2018 değerlendirme sonucu	Yetersiz (GÖ sınırında)	Can Güvenliği (CG) performans düzeyi yerine GÖ’ye ulaşmıştır.
Eurocode-8 karşılaştırması	Daha yüksek talepler → daha olumsuz sonuç beklenir.	Detaylar için Tablo 3’e bakınız.

Tablo 8. TBDY-2018 ve Eurocode-8 Arasındaki Mühendislik Temelli Farklılıklar

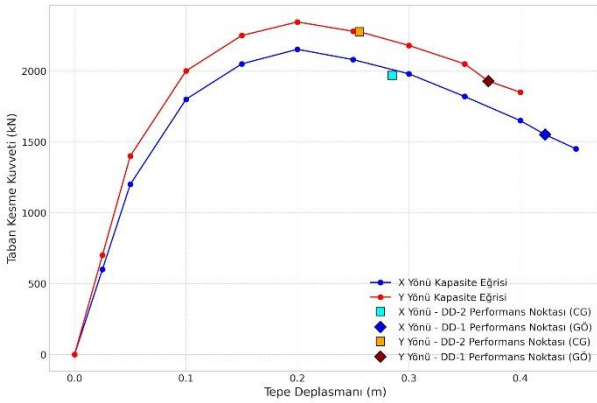
Kriter	TBDY-2018	Eurocode-8 (EN 1998-1:2004)	Mühendislik Yorumu
Tasarım Felsefesi	Performans esaslı (hedeflenen performans düzeyi: GÖ, CG, HK)	Kapasite tasarımı esaslı, elastik spektrum + davranış katsayısı yaklaşımı	TBDY doğrudan performans hedefini tanımlar; EC8’de dolaylıdır.
Davranış Katsayısı (R)	4-8 (sistem türüne göre)	3-5 (duvarlı çerçeveler için)	TBDY’de süneklik talebi daha yüksektir; bu da taban kesme kuvvetlerini düşürür.
Süneklik Tanımı	Süneklik, yer değiştirme oranlarıyla doğrudan tanımlanır (Δ_{CG} , $\Delta_{GÖ}$)	Süneklik “q faktörü” üzerinden dolaylı olarak tanımlanır	TBDY daha doğrudan bir deformasyon-kontrollü yaklaşım izler.
Zemin Sınıflaması	ZC, ZD, ZE (V_{s30} esaslı, detaylı jeoteknik etüt zorunlu)	A-E (V_{s30} aralığına dayalı)	TBDY, yerel zemin etkilerini daha detaylı sınıflandırır.
Deprem Tehlikesi Tanımı	5 farklı deprem düzeyi (DD-1-DD-5) ve spektrumlar	Tek “tasarım depremi” (475 yıl, %10 aşılma olasılığı)	TBDY, çok seviyeli performans değerlendirmesine olanak sağlar.
İtme Analizi (Pushover)	DD-1, DD-2 hedef performans noktalarıyla zorunlu	İsteğe bağlı (Annex B)	TBDY’de zorunlu olması, doğrusal olmayan davranışın daha güvenilir incelenmesini sağlar.
Damping Oranı	%5 sabit	%5 sabit	Aynı; ancak TBDY, modal katkıların kombinasyonunu farklı katsayılarla ele alır.
Deprem Kuvvetlerin in Dağılımı	Mod birleştirme (CQC, SRSS) zorunlu	Mod süperpozisyonu (SRSS) önerilir	TBDY, çok modlu etkiyi daha kapsamlı ele alır.
Uygulama Alanı	Türkiye’de yeni ve mevcut yapıların performans esaslı değerlendirilmesi	Avrupa genelinde yeni yapıların tasarımı	TBDY, mevcut yapıların deprem sonrası analizine özel bölümler içerir.

Tablo 8’de görüldüğü üzere, TBDY-2018 ve Eurocode-8 arasındaki farklar yalnızca sayısal parametrelerle sınırlı değildir; tasarım felsefesi, süneklik tanımı ve zemin sınıflaması düzeyinde de farklılık göstermektedir. Özellikle TBDY’nin performans esaslı doğası, deprem sonrası yapı güvenliği değerlendirmelerinde mühendislik açısından daha detaylı ve gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Bu durum, çalışma kapsamında yapılan karşılaştırmalarda da gözlenmiş ve EC8’in öngördüğü deprem taleplerinin daha yüksek olmasıyla tutarlı bulunmuştur.

Yapıda Gözlemlenen Zafiyetler

İncelenen binanın taşıyıcı sisteminde, düşük beton kalitesine ek olarak özellikle zemin katlarda kısa kolon etkileri ve bazı birleşim bölgelerinde yetersiz enine donatı düzenlemeleri tespit edilmiştir. Bu durum, elemanların süneklik kapasitesini azaltarak ani göçme riskini artırabilecek bir zafiyet olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, yapının oturduğu zayıf zemin koşulları yapı–zemin etkileşimini kritik hale getirmiş, analizlerde ise özellikle yatay ötelenme taleplerinin artmasına neden olmuştur (bkz. Şekil 5).



Şekil 5. Yapının kapasite eğrisi ve hedef deplasman noktası.

Not: Kapasite eğrileri, pushover analizi sonuçlarından elde edilmiştir. DD-1 (Göçmenin Önlenmesi, GÖ) ve DD-2 (Can Güvenliği, CG) ifadeleri, TBDY-2018 Bölüm 15’e göre tanımlanmış deprem düzeyleri için hesaplanan *hedef deplasman taleplerini* göstermektedir. Bu noktalar, yapının ilgili deprem düzeylerindeki *performans seviyesinin* belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

Tartışma

Bulguların Literatürle Karşılaştırılması

Bu çalışmada elde edilen bulgular, NDT yöntemlerinin beton basınç dayanımını tahmin etmedeki etkinliğini ortaya koymaktadır. Özellikle WP yönteminin, SH kıyasla istatistiksel olarak anlamlı ve çok daha yüksek bir güvenilirlik sunduğu görülmüştür. WP yöntemi ile karot basınç dayanımları arasındaki determinasyon katsayısı ($R^2 \approx 0.80$), literatürde raporlanan güçlü ilişkilerle uyumludur [12], [15]. Buna karşılık SH yönteminin karot dayanımı ile ilişkisi oldukça zayıf kalmıştır. Bu durumun, SH testinin yüzey sertliği,

karbonatlaşma ve nem gibi dış etkenlere duyarlılığından kaynaklandığı düşünülmekte olup literatürde de benzer şekilde rapor edilmiştir [11], [13]. Bu çalışmanın temel odak noktası, NDT yöntemlerinin mutlak dayanım tahmini performansı olduğundan, SH’nin bu bağlamdaki istatistiksel zayıflığı öne çıkmıştır. Yöntemin, yapı içindeki göreceli beton kalitesini değerlendirme veya potansiyel zayıf bölgeleri belirleme gibi farklı pratik uygulamalardaki rolü, bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

İki yöntemin birlikte değerlendirildiği kombine (SH + WP) modelde ise determinasyon katsayısı $R^2 \approx 0.877$ ($p < 0.05$) seviyesinde bulunmuştur. (Ayrıntılı regresyon tahmin aralıkları için bkz. Ek A, Şekil A1–A2). Bu sonuç, çoklu parametrelerin birlikte kullanılmasının tekil yöntemlere göre daha güvenilir tahminler sunduğunu gösteren çalışmaları desteklemektedir [12], [15]. Bununla birlikte, kombine modelin sağladığı iyileşmenin tek başına WP yöntemine kıyasla sınırlı olduğu dikkate alınmalıdır. Dolayısıyla, bu yapı özelinde pratik uygulamalarda hızlı ve güvenilir tahminler için WP yöntemi tek başına yeterli görülürken, en yüksek model doğruluğu için kombine modelin tercih edilmesi önerilmektedir.

Burada istatistiksel anlamlılık ile pratik anlamlılık ayrımı vurgulanmalıdır: Kombine modelin R^2 artışı dikkate değer olsa da, SH ölçümlerinin sahada yarattığı ek iş yükü, zaman ve maliyet unsurları göz önüne alındığında bu katkı mühendislik uygulamalarında sınırlı kalabilir.

Bu bulgular, Türkiye’deki literatürle de tutarlıdır. Çakoğlu (2025) [1], Karaman (2023) [9], Turan ve Tanrıku (2013) [11], Ekin (2025) [12] ve Demir, Ulucan ve Alyamaç (2023) [14] çalışmalarında, NDT yöntemlerinin karot dayanımı ile kalibrasyonunun önemini ve çoklu regresyon modellerinin tekil yöntemlere göre daha yüksek açıklayıcılığa sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışma, söz konusu bulguları deprem sonrası ağır hasar almış bir betonarme bina üzerinde doğrulayarak ulusal literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Performans Analizleri

TBDY-2018 ve Eurocode-8 yönetmeliklerine göre yapılan karşılaştırmalı analizlerde, EC8 kapsamında taban kesme kuvvetleri, tepe deplasmanları ve moment değerlerinin genellikle daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür [4], [26]. Bu çalışmada da EC8’in TBDY-2018’e kıyasla daha büyük talepler ürettiği belirlenmiş, ayrıntılar Tablo 3’te sunulmuştur. Bulgular, önceki çalışmaların uluslararası yönetmeliklerin Türk yönetmeliklerine kıyasla daha muhafazakâr tasarımlar öngördüğüne dair değerlendirmeleriyle tutarlıdır [16], [17]. 2023 Kahramanmaraş deprem dizisi sonrası bazı bölgelerde ölçülen ve tasarım spektrumunu aşan ivmeler, sahada beklenenden yüksek taleplerin oluşabildiğine işaret etmektedir [27]. 2020 Samos depremi sonrasında yürütülen ayrıntılı saha çalışmaları ise havza etkisi ve zemin büyütmesinin 0.5–1.5 s periyot aralığında talepleri %40’a kadar artırabildiğini göstermiştir [28]. Bu bulgular, zemin koşullarının deprem talepleri üzerindeki belirleyici rolünü vurgular.

Söz konusu tablo, bu çalışmadaki diğer verilerle birlikte değerlendirildiğinde daha da kritik hâle gelmektedir: (i) incelenen yapı zayıf bir zemin (ZD) üzerindedir, (ii) daha az katı bir çerçeve sunan TBDY-2018 altında dahi GÖ sınırına yaklaşmıştır (bkz. Şekil 5) ve (iii) EC8, %28–33 oranında daha yüksek sismik talepler öngörmektedir. Bu üç verinin bileşkesi, yönetmelikler arası “muhafazakârlık farkı”nın özellikle zayıf zeminlerde yalnızca küçük bir güvenlik marjı meselesi olmadığını; kimi durumlarda yapısal güvenlik kararını “kabul”den “ret”e çevirebilecek bir faktör olduğunu göstermektedir. Nitekim 2023 depremleri sonrasında raporlanan çok sayıda sivilaşma/oturma vakası, ayrıntılı jeoteknik etütlerin performans esaslı değerlendirmelerde zorunluluğunu bir kez daha ortaya koymuştur [29].

SH ve WP’nin Birlikte Kullanımının Avantajları

Literatürde, SH ve UPV gibi yöntemlerin birlikte kullanıldığı SonReb yaklaşımının, tekil yöntemlere göre daha düşük hata payı sağladığı belirtilmektedir [25]. Benzer şekilde, çoklu doğrusal regresyon analizlerinin ikili regresyonlara göre daha yüksek açıklayıcılığa ulaştığı rapor edilmiştir ($R^2 \approx 0.915$) [12]. Bu çalışmada da SH ve WP’nin birlikte kullanımı, tekil yöntemlere kıyasla daha yüksek açıklama gücü sağlamış ve modelin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Bu, sahadan elde edilen verilerin literatürde önerilen kombine yaklaşımlarla uyumlu sonuçlar verebileceğini gösterir; ancak WP’nin tek başına sunduğu yüksek güvenilirlik ve sahadaki operasyonel maliyet dikkate alınarak mühendislik değiş-tokuşu yapılmalıdır. Bu sonuç, Tablo 4’te sunulan regresyon performans parametreleriyle de uyumludur.

Yöntemin Sınırlılıkları ve Belirsizlikler

SH sonuçlarının düşük güvenilirlik göstermesinin en önemli nedeni, test sonuçlarını etkileyen çevresel ve yapısal faktörlerdir. Nem içeriği, yüzey pürüzlülüğü ve ayrışma derecesi, ölçüm değerlerinde %19–54 arasında farklılık yaratabilmektedir [11], [13]. Literatürde de belirtildiği üzere, doymuş ve kuru yüzeylerden elde edilen değerler arasındaki fark %34’e kadar çıkabilmektedir [14]. Ayrıca, örneklem büyüklüğünün sınırlı olması ($n=20$), deprem sonrası taşıyıcı sisteme zarar vermeme zorunluluğundan kaynaklanmıştır. Bu durum, çalışmanın istatistiksel gücünü azaltmakla birlikte, gerçek saha koşullarının pratik yansımasıdır. Belirsizlik analizine ilişkin bootstrap sonuçları Ek-B’de ayrıntılı olarak sunulmuştur. Ayrıca çalışmanın, 6 Şubat 2023 depremlerinde orta hasar görmüş bir bina üzerinde yürütülmüş olması, elde edilen kalibrasyon eğrilerinin hasarsız veya farklı hasar seviyelerindeki beton yapılar için doğrudan genellenabilirliğini sınırlamaktadır.

UPV’nin Kullanılmaması ve Gelecek Çalışmalar

UPV yönteminin, karot dayanımlarıyla %75–80 oranında benzerlik sağladığı ve SH’ye kıyasla daha yüksek güvenilirlik sunduğu önceki çalışmalarda belirtilmiştir [1], [11]. Ancak bu çalışmada, afet bölgesinde gerekli ekipmanlara erişim güçlükleri ve orta hasarlı elemanlarda yaygın mikroçatlak ağlarının ultrasonik sinyalleri zayıflatması nedeniyle UPV testi uygulanamamıştır. Bu durum, literatürde yaygın olarak kullanılan SonReb (SH + UPV) yaklaşımıyla doğrudan

karşılaştırma yapılmasını sınırlamıştır. Bu durum, çalışmada uygulanan test kapsamının Tablo 1’de sunulan saha verileriyle sınırlı olduğunu da göstermektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, daha az hasarlı veya hasarsız yapılarda WP ve UPV yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla daha güvenilir çoklu regresyon modellerinin geliştirilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın $n = 20$ gibi sınırlı bir örneklemle yürütülmesi, klasik istatistiksel yöntemlerin belirsizlik yönetiminde yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, sınırlı veri setleriyle güçlü çıkarımlar yapabilen Bayesçi modellerin [22] ve NDT verileriyle beton dayanımı arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri tanımlamada başarılı yapay zekâ tabanlı yöntemlerin (ANN, SVM, ANFIS) [24], [25] gelecekteki araştırmalarda önemli bir potansiyel taşıdığı değerlendirilmektedir. Bu ileri yaklaşımlar, afet sonrası sınırlı karot alınabilen saha koşullarında dayanım tahmininin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmak için etkili bir çözüm sunacaktır.

Gerçek Afet Koşullarında Veri Toplamanın Önemi

Bu çalışmada kullanılan veri seti, kontrollü laboratuvar ortamında değil; 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında Malatya’da orta hasar görmüş bir betonarme binada, afet bölgesinin zorlu koşulları altında toplanmıştır. Örneklem sayısının $n = 20$ ile sınırlı kalması, taşıyıcı sistemin bütünlüğünü koruma, mülk sahiplerinin izinleri ve maliyet kısıtları gibi pratik nedenlerden kaynaklanmıştır. Bu bağlamda az sayıda karot alınabilmesi bir eksiklik değil, deprem sonrası gerçek saha koşullarının doğal bir sonucu olarak değerlendirilmelidir [1], [13].

Benzer biçimde, Onat ve arkadaşları [28] da 2020 Samos depremi sonrasında yürüttükleri saha çalışmalarında, yerinde yapılan ölçümlerin laboratuvar testleriyle tam örtüşmediğini, ancak bu tür “saha kaynaklı veri setlerinin” gerçek davranışın anlaşılmasında çok daha temsil gücü yüksek olduğunu vurgulamıştır.

Dolayısıyla bu çalışma, literatürdeki steril laboratuvar koşullarında gerçekleştirilen araştırmalardan ayrılmakta; saha temelli gözlemler üzerinden üretilen bulgulara yüksek özgünlük ve pratik değer kazandırmaktadır. Kullanılan veri seti, yüksek maliyet, saha riski ve yoğun emek ile elde edilmiş “kıymetli veri” (hard-won data) olarak değerlendirilmektedir.

İstatistiksel ve Pratik Anlamlılık Dengesi

Kombine modelin (SH + WP) istatistiksel olarak daha yüksek bir determinasyon katsayısı ($R^2 \approx 0.877$) üretmiş olması, bu modelin her koşulda en uygun seçenek olduğu anlamına gelmemektedir. Bu istatistiksel üstünlüğün mühendislik açısından pratik anlamlılığı, bir değiş-tokuş (trade-off) çerçevesinde değerlendirilmelidir.

SH ölçümleri sahadaki yüksek varyans göstermekte, yüzey koşulları ve nem gibi çevresel faktörlerden güçlü biçimde etkilenmekte [10], [11], ayrıca ek zaman ve maliyet gerektirmektedir. Deprem sonrası gibi zamanın ve kaynakların sınırlı olduğu durumlarda, zaten güvenilirliği düşük olan bir yöntemin eklenmesi, açıklama gücündeki marjinal artışı mühendislik açısından haklı çıkarmayabilir.

Buna karşın, WP yöntemi tek başına $R^2 \approx 0.80$ düzeyinde güvenilirlik sağlayarak, afet sonrası hızlı ve maliyet-etkin değerlendirmeler için pratik bir alternatif sunmaktadır [12], [13], [22]. Bu bulgu, yalnızca istatistiksel bir karşılaştırma değil, aynı zamanda gerçek saha koşullarına yönelik bir mühendislik çıkarımı niteliğindedir.

Son yıllarda geliştirilen hibrit yapay zekâ tabanlı modeller (ör. ANN–GEP–PSO) da, saha verilerinde hem istatistiksel hem pratik doğruluğu artırarak bu tür değiş-tokuşların dengelenebileceğini göstermektedir [30]. Dolayısıyla, deprem sonrası değerlendirmelerde WP tek başına kullanımı, veri güvenilirliği, zaman ve maliyet açısından en rasyonel çözüm olarak öne çıkmaktadır.

Sonuçlar

Bu çalışmada, deprem sonrası ağır hasar almış bir betonarme binada yapılan detaylı performans analizi kapsamında, tahribatsız test (NDT) verileri ile karot basınç dayanımlarının kalibrasyonu esas alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, hem TBDY-2018 hem de Eurocode-8 yönetmelikleri doğrultusunda karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

(1) NDT yöntemlerinden *Windsor Probe (WP)*, *Schmidt çekici (SH)*'ye göre beton basınç dayanımını tahmin etmede istatistiksel olarak daha güçlü bir korelasyon göstermiştir. WP yöntemiyle elde edilen dayanım değerleri, karot basınç dayanımlarıyla yüksek determinasyon katsayısı ($R^2 \approx 0.80$) sağlamıştır.

(2) Kombine (SH + WP) modelinin R^2 değeri 0.877'ye ulaşmış, ancak SH ölçümlerinin saha uygulamasında yarattığı zaman ve maliyet yükü dikkate alındığında, WP yönteminin tek başına kullanımının mühendislik açısından yeterli olduğu belirlenmiştir.

(3) TBDY-2018 kapsamında yapılan performans analizi sonucunda, yapı DD-2 (Can Güvenliği) düzeyinde *CG sınırında*, DD-1 (Göçmenin Önlenmesi) düzeyinde ise *GÖ sınırında* performans göstermiştir. Maksimum görel kat ötelenmesi oranları X yönünde 0.0072, Y yönünde 0.0068 olarak bulunmuştur. Bu performans değerleri Tablo 5 ve Şekil 5'te ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.

(4) Eurocode-8 analizinde, davranış katsayısı $q = 3.0$ ve zemin sınıfı C kabul edilmiştir. TBDY-2018'e göre ortalama %10–15 daha yüksek deplasman talepleri elde edilmiş; bu durum TBDY'nin zemin davranışını daha detaylı temsil etmesinden kaynaklanmıştır. Karşılaştırmalı farklar Tablo 3'te sunulmuştur.

(5) NDT kalibrasyonlu analiz (Analiz A) ile yalnız karot verisine dayalı analiz (Analiz B) arasında önemli farklar tespit edilmiştir. NDT kalibrasyonlu yaklaşımda beton dayanımı 24.9 MPa, karot tabanlı yaklaşımla 19.8 MPa bulunmuştur. Bu fark, performans seviyesini *GÖ sınırından CG sınırına* taşımış; böylece yapı güvenliği değerlendirmesinde yaklaşık %20 daha yüksek bir dayanım öngörülmüştür. Bu farklar Tablo 6'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

(6) Analiz sonuçları, yalnız karot dayanımına dayalı TBDY-2018 hesaplarının, yapısal davranışı daha olumsuz tahmin ettiğini ve bu nedenle ekonomik olmayan güçlendirme kararlarına yol açabileceğini göstermektedir.

NDT kalibrasyonlu yöntem ise saha koşullarında daha güvenilir, hızlı ve maliyet etkin bir değerlendirme sağlamaktadır.

(7) Eurocode-8 ve TBDY-2018 arasındaki temel fark, tasarım felsefesinden kaynaklanmaktadır. TBDY-2018 performans esaslı doğrudan bir değerlendirme yaklaşımı sunarken, Eurocode-8 dolaylı (q faktörü) yaklaşımına dayanmaktadır. Bu farklılık, TBDY analizlerinde mevcut binalar için daha gerçekçi ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

Sonuç olarak, kalibrasyonlu NDT yöntemiyle elde edilen beton dayanımları kullanılarak yapılan performans analizleri, yalnız karot tabanlı yöntemlere göre daha dengeli, sahaya uygun ve ekonomik sonuçlar sunmaktadır. Bu yaklaşım, deprem sonrası hızlı ama güvenilir yapı değerlendirmelerinde uygulanabilir bir mühendislik modeli olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmanın Özgün Katkıları

Bu araştırma, 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında orta hasar görmüş bir betonarme bina üzerinde yürütülen saha uygulamalarıyla literatüre özgün katkılar sunmaktadır. Öncelikle, SH-WP kombinasyonunun deprem sonrası hasarlı bir yapı üzerinde test edilmesi ve SH verilerinin yüksek varyansı nedeniyle iyileşmenin sınırlı kaldığının ortaya konulması, literatürde yaygın biçimde kabul gören “kombine yöntemlerin daima üstün olduğu” varsayımına eleştirel bir perspektif kazandırmıştır.

Ayrıca, NDT–karot kalibrasyonunun Sta4CAD tabanlı yapısal analizlerle ve BIM ortamındaki dijital ikiz yaklaşımıyla bütünleştirilmesi, afet sonrası yapı değerlendirmelerinde hızlı ve güvenilir karar desteği sağlayabilecek pratik bir mühendislik iş akışının uygulanabilirliğini göstermiştir (karşılaştırmalı sonuçlar için bkz. Tablo 6). Bunun yanında, TBDY-2018 ve Eurocode-8 arasındaki sismik talep farklılıklarının yüzdesel olarak raporlanması, yönetmelikler arası karşılaştırmalara nicel bir derinlik kazandırmıştır (bkz. Tablo 3). Saha koşullarında karot sayısının 20 ile sınırlı olması, bir kısıt olarak görülmekle birlikte, gerçek mühendislik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bu duruma pragmatik bir çözüm sunmuştur. Tüm bu yönleriyle çalışma, yalnızca bir vaka analizi olmanın ötesine geçerek hem ulusal hem de uluslararası literatüre referans teşkil edebilecek metodolojik bir çerçeve önermektedir.

Kaynaklar

- [1] A. H. Çakoğlu, “Tahribatlı ve Tahribatsız Beton Testlerinin Güçlendirmenin Binalardaki Sonuçlarının Analizi,” *Türkiye Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 2025, doi:10.70562/tubid.1582509.
- [2] B. Rucka, “Special Issue: Non-Destructive Testing of Structures,” *Materials*, vol. 13, no. 11, pp. 1–15, 2020.
- [3] Ł. Sadowski, “Non-Destructive Testing in Building Assessment,” *Buildings*, vol. 12, no. 8, pp. 1–12, 2022.
- [4] E. Ekinci and A. Özmen, “Evaluation of Seismic Performance of an 11-Storey RC Building Damaged in 2023 Kahramanmaraş Earthquake,” *Black Sea Journal of*

Engineering and Science, 2024, doi:10.34248/bsengineering.1588734.

[5] E. T. Tunç, "Relationship Between Schmidt Hammer Rebound Hardness Test and Concrete Strength Tests for Limestone Aggregate Concrete," *Materials*, vol. 18, no. 6, p. 1388, 2025, doi:10.3390/ma18061388.

[6] İ. B. Topçu and İ. Hocaoglu, "Volkanik Cüruf Modifiyeli Betonlarda Hasarsız Deneylerle Basınç Dayanımı Tahmini," *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2025.

[7] M. Erdal and O. Şimşek, "Bazı tahribatsız deney metotlarının vakum uygulanmış betonların basınç dayanımlarının belirlenmesindeki performanslarının incelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 21, no. 1, pp. 65–73, 2006.

[8] K. E. Alyamaç and J. Olek, "The use of drilling tests to assess the strength of building materials: Review of existing methods and a proposed new technique," in *Proc. 4th Int. Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2017)*, Zurich, Switzerland, Sep. 2017.

[9] M. Ulucan, Y. Taş, and K. E. Alyamaç, "Yerinde Erken Yaş Beton Dayanımını Belirlemek İçin Kombine Metotların Geliştirilmesi," *AKÜ FEMÜBİD*, vol. 22, pp. 1400–1412, 2022, doi:10.35414/akufemubid.1147118.

[10] K. Karaman, "Schmidt Çekici Geri Tepme Sayılarını Etkileyen Faktörlerin Nicel Değerlendirilmesi," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2023, doi:10.21923/jesd.1251636.

[11] M. Turan and M. A. Tanrıku, "Hasarsız Deney Yöntemleri ile Beton Kalitesinin Belirlenmesi," *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, no. 32, pp. 1–12, 2013.

[12] N. Ekin, "Beton Dayanımı Tahmininde İkili ve Çoklu Doğrusal Regresyon Analizlerinin Karşılaştırılması," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 64–77, 2025, doi:10.21923/jesd.1572342.

[13] Ö. Arıöz, "Beton Dayanımının Standart, Tahribatlı, Yarı-Tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi," Ph.D. dissertation, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, 2004.

[14] T. Demir, M. Ulucan, and K. E. Alyamaç, "Development of Combined Methods Using Non-Destructive Test Methods to Determine the In-Place Strength of High-Strength Concretes," *Processes*, vol. 11, no. 3, p. 673, 2023, doi:10.3390/pr11030673.

[15] N. M. Fawzi, "Prediction of Compressive Strength of Reinforced Concrete Structural Elements by Using Combined Non-Destructive Tests," *Journal of Engineering and Development*, vol. 19, no. 10, pp. 1–12, 2013.

[16] S. Eraslan, İ. K. Hatipoğlu, F. Ocak, F. Işık, and H. İ. Zeybek, "6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremlerinde Yıkılan Binalar ile Zemin İlişkinin İncelenmesi ve Depremde Yıkıma Uğrama Riski Analizi," *Geomatik Dergisi*, 2024, doi:10.29128/geomatik.1422639.

[17] T. Kap, E. Özgan, and M. M. Uzunoğlu, "Taşıma Gücü Zayıf Zeminde İnşa Edilmiş Betonarme Bir Bina'nın Performans Analizi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 7, pp. 795–809, 2019.

[18] L. Bertolini, G. Gattesco, F. Berto, et al., "BIM-Based Approach Integrating MLS and GPR for Infrastructure Monitoring," *Infrastructures*, vol. 8, no. 12, pp. 1–15, 2023.

[19] E. Candigliota, G. Pascale, M. Corrado, et al., "Multi-Domain Monitoring Platform Integrating NDT and Digital Twins for RC Buildings," *Sustainability*, vol. 17, no. 4, pp. 1–20, 2025.

[20] R. L. Machado and C. Vilela, "Conceptual Framework for Integrating BIM and Augmented Reality in Construction Management," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 25, pp. 1–20, 2020.

[21] B. Atazadeh, L. H. Mirkalaei, H. Olfat, A. Rajabifard, and D. Shojaei, "Integration of Cadastral Survey Data into Building Information Models," *Geospatial Information Science*, vol. 24, no. 3, pp. 387–402, 2021, doi:10.1080/10095020.2021.1937336.

[22] B. Badarloo and P. Lehner, "Practical Aspects of Correlation Analysis of Compressive Strength from Destructive and Non-Destructive Methods in Different Directions," *Infrastructures*, vol. 8, no. 11, p. 155, 2023, doi:10.3390/infrastructures8110155.

[23] S. Yörübulut, M. Alkan Çakıroğlu, A. Daloğlu, and E. Zorlu, "Tahribatsız Yöntem Kullanılarak Yapay Sinir Ağı ve Regresyon Yöntemi ile Beton Basınç Dayanımının Veri Tahmini," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 12, no. 2, pp. 88–95, 2020.

[24] T. Q. L. Ngo, Y.-R. Wang, and D.-L. Chiang, "Applying Artificial Intelligence to Improve On-Site Non-Destructive Concrete Compressive Strength Tests," *Crystals*, vol. 11, no. 10, p. 1157, 2021, doi:10.3390/cryst11101157.

[25] Y.-F. Shih, Y.-R. Wang, K.-L. Lin, and C.-W. Chen, "Improving Non-Destructive Concrete Strength Tests Using Support Vector Machines," *Applied Sciences*, vol. 5, no. 10, pp. 1–15, 2015, doi:10.3390/app5100001.

[26] A. A. Ahmed, H. Öztürk, and T. A. Aslan, "Farklı Kat Yüksekliklerindeki Binaların TBDY 2018 ve Eurocode 8'e Göre Karşılaştırmalı Analizi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2025, doi:10.21605/cukurovaumfd.1650631.

[27] B. Onat, F. Varolüneş, and H. Sert, "Post-earthquake performance assessment of RC structures after the 2023 Türkiye Earthquakes," *Journal of Earthquake and Tsunami*, vol. 18, no. 2, 2024.

[28] B. Onat and F. Varolüneş, "Field reconnaissance and structural assessment following the 2020 Samos earthquake: Lessons from Türkiye," *Natural Hazards*, vol. 119, pp. 1–21, 2022.

[29] F. Varolüneş, "Seismic vulnerability and soil-related deficiencies in Turkish building stock after the 2023 earthquakes: A bibliometric perspective," *Natural Hazards*, 2025. doi.org/10.1142/s1793431124500131

[30] M. Gupta, M. A. Khan, R. Butola, and R. M. Singari, "Advances in applications of non-destructive testing (NDT): A review," *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2021, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2021.1909332>

[31] E. M. H. Ismaeil, "Asset Information Model Management-Based GIS/BIM Integration in Facility Management Contracts," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, p. 2495, 2024, doi: 10.3390/su16062495.

[32] V. Pérez-Andreu, A. Adán Oliver, and J. L. Vivancos Bono, "Thermal Characterization of Buildings with As-Is Thermal-BIM," *Automation in Construction*, vol. 149, p. 104856, 2023.

[33] M. Hassani and U. Dackermann, "Machine learning applications for non-destructive testing and evaluation of concrete structures: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 23, no. 14, 2023.

Etik Kurul İzni

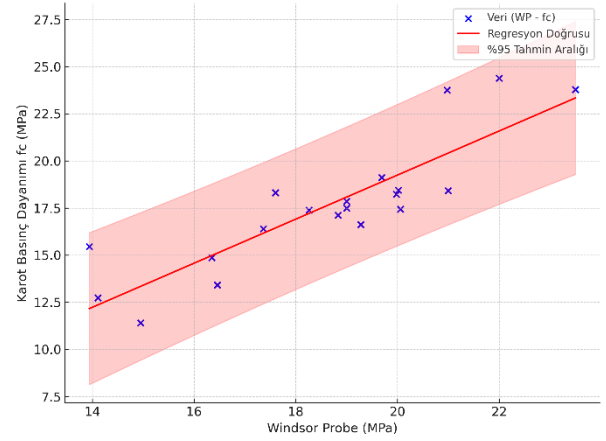
Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Çıkar Çatışması

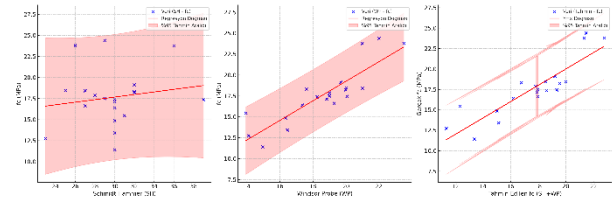
Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Ek A. Regresyon Modellerine Ait Tahmin Aralıkları

Bu bölümde, SH, WP ve SH+WP regresyon modellerine ait %95 tahmin aralıklarını içeren ek şekiller sunulmaktadır. Bu şekiller, ana metinde sunulan regresyon denklemlerinin pratikteki belirsizlik düzeylerini görsel olarak ortaya koymaktadır.



Ek Şekil A1. Windsor probe (WP) ile karot basınç dayanımı (fc) arasındaki regresyon doğruları ve %95 tahmin aralıkları.



Ek Şekil A2. Schmidt çekici (SH), Windsor Probe (WP) ve SH+WP kombinasyonu ile karot basınç dayanımı (fc) arasındaki regresyon doğruları ve %95 tahmin aralıkları.