



## SAHA VERİLERİ İŞİĞİNDA BETONARME BİNA DEPREM PERFORMANSININ GÜVENİLİR TAHMİNİ

Abdullah DİLSİZ<sup>1\*</sup>, Polat GÜLKAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Civil Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Başkent University, Department of Civil Engineering, 06790, Ankara, Türkiye

**Özet:** Binaların ve özelde betonarme binaların, doğrusal olmayan deprem tepkisinin tahmini bir zorluk olmaya devam etmektedir. Sıradan yapıların sismik talebini ve doğrusal olmayan davranışını makul bir şekilde tahmin edebilmek için farklı hassasiyette pek çok yöntem önerilmiştir. Yöntemlerin tahminleri genellikle Doğrusal Olmayan Tepki Geçmiş Analizi'nin (NRHA) "kesin" sonuçlarıyla karşılaştırılır. Bu çalışmada, NRHA sonuçlarına dayalı olarak yönetmeliklerce belirlenmiş detaylı değerlendirme yöntem tahminleri ve pratik olarak kullanılan bazı ön değerlendirme yöntem tahminleri, güçlü yer hareketlerine maruz kalmış gerçek yapıların performans kayıtlarıyla karşılaştırılmıştır. Hasar görmüş yapılarla ilgili bilgiler Adapazarı'ndan toplanmıştır. Deprem sonrasında binaların gerçek durumunu ve genel hasar durumlarını tarif eden verilerden yararlanılarak, EuroCode-8-3, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerinin detaylı değerlendirme yöntemleri, 1999 Marmara Depremi'nin Adapazarı'nda yarattığı etkileri yeniden elde etmek amacıyla uygulanmıştır. Çalışılan binalar için NRHA sonuçlarına göre kullanılan hiçbir hesap yaklaşımının her durumda performansı güvenilir bir şekilde tanımlayabileceğine dair net bir sonuç bulunmamaktadır. Bu nedenle, analiz sonuçlarının hesaplanması ve işlenmesi için harcanan yüksek çaba da göz önüne alındığında, binaların genel sismik performansları ön değerlendirme yöntemleri ile ayrıca değerlendirilmiştir. Ayrıntılı değerlendirme sonuçlarının aksine, incelenen hassas binalar bazı ön değerlendirme yöntemleriyle başarıyla değerlendirilebilmiş ve depremin neden olduğu orta veya ağır hasara göre sınıflandırılabilmiştir. Betonarme binaların sismik davranışına ilişkin testlerden elde edilen bilgiler, sahadan elde edilen daha fazla veriyle desteklenmelidir. Malzeme özelliklerindeki değişimler, geometri, yer hareketi varyasyonları ve diğer birçok parametre nedeniyle saha verileri ile değerlendirme prosedürleri arasındaki tutarsızlıklar göz önüne alındığında, bu yöntemlerin tahmin gücü konusunda daha iyimser olunması gerektiği açıktır.

**Anahtar kelimeler:** Elastik ötesi davranış, Deprem davranışı, Ön değerlendirme yöntemleri, Detaylı değerlendirme yöntemleri


### Reliable Seismic Performance Prediction of RC Buildings in the Light of Field Data


**Abstract:** The prediction of nonlinear earthquake response of buildings, and specifically reinforced concrete buildings, continues to be a challenge. Many methods with different levels of reliability have been developed to reasonably predict the seismic demand and nonlinear behavior of ordinary structures. The predictions of the methods are usually compared with the "exact" results from Nonlinear Response History Analysis (NRHA). In this study, detailed evaluation method predictions determined by NRHA results and some preliminary predictions used in practice are compared with the observed performance records of real structures subjected to strong ground motions. Information on damaged structures was collected from Adapazarı. Using the data describing the real condition and general damage status of the buildings after the earthquake, detailed evaluation methods of EuroCode-8-3, DBYBHY-2007 and TBDY-2018 regulations were applied to reproduce the effects of the 1999 Marmara Earthquake in Adapazarı. According to the NRHA results for the studied buildings, there is no clear conclusion that any of the procedures can reliably predict the performance at nearly all stages of drift. Therefore, considering the intense labor spent on analyses and processing the results, the general seismic performance of the buildings was also evaluated separately with simplified preliminary assessment methods. In contrast to the detailed assessment results, the response of damaged buildings was successfully reproduced with some preliminary assessment procedures. These were classified as moderate or severe damage caused by the ground shaking. The information obtained from lab tests on the seismic behavior of reinforced concrete buildings should be supported by more data obtained from the field. Considering the inconsistencies between the field data and the assessment procedures due to the changes in material properties, geometry, ground motion variations and many other parameters that are usually unavailable, it is clear that the predictive power of these methods should be viewed with more favorable attention.

**Keywords:** Nonlinear response, Seismic response, Preliminary assessment procedures, Detailed assessment procedures

\*Sorumlu yazar (Corresponding author): Abdullah DİLSİZ, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Civil Engineering, 06010, Ankara, Türkiye

E mail: adilsiz@aybu.edu.tr (A. DİLSİZ)

Abdullah DİLSİZ  <https://orcid.org/0000-0002-1750-9327>

Polat GÜLKAN  <https://orcid.org/0000-0001-7542-7082>

**Gönderi:** 8 Ocak 2025

**Kabul:** 11 Şubat 2025

**Yayınlanma:** 15 Mart 2025

**Received:** January 8, 2025

**Accepted:** February 11, 2025

**Published:** March 15, 2025

**Cite as:** Dilsiz A, Gülkan P. 2025. Reliable seismic performance prediction of RC buildings in the light of field data. BSJ Eng Sci, 8(2): 444-454.

### 1. Giriş

Büyük depremler öncesinde mevcut binaların performans değerlendirmesi ve risk analizlerinin önemi,

son Kahramanmaraş Depremleri ile bir kez daha gün yüzüne çıkmış bulunmaktadır. 6 Şubat 2023 tarihinde, Kahramanmaraş ilinin Pazarcık ve Elbistan ilçeleri



yakınlarında, yalnızca 9 saat arayla ve 95 km mesafeyle Mw 7.7 ve Mw 7.6 büyüklüğünde iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir. Bu depremler birçok çevre ili kapsayan geniş bir alanda büyük yıkıma yol açmış ve çok sayıda bina ağır şekilde hasar görmüş ya da yıkılmıştır. Deprem bölgesinde yaklaşık 700,000 bina çeşitli seviyelerde hasar görünürken, bunların yaklaşık 230,000 kadarı ağır hasar görmüş ya da yıkılmıştır (AFAD 2023, Dilsiz vd., 2023, SBB 2023). Bu miktardaki yıkımın sebep olduğu 50,000'i aşan büyük can kaybı ise, tıpkı 1999 Marmara Depremi ve diğer depremlerde olduğu gibi, depremlerin vukuundan önce binaların performans değerlendirilmesinin yapılması zaruretini ortaya koymuş bulunmaktadır.

Mevcut binaların detaylı değerlendirilmesi, bazı ülkelerin deprem yönetmelik ve ilgili kılavuzlarında yer alan yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. ABD'de ASCE/SEI-41/06 (ASCE, 2007), Supplement-1 (ASCE, 2008), ve son versiyonu ASCE/SEI-41/23 (ASCE, 2023), Avrupa'da EuroCode-8-3 (EC, 2005) örnek olarak verilebilir. Türkiye'de mevcut bina değerlendirme yöntemi ilk defa Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007)'de yer almış, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018)'de güncellenmiştir. Detaylı değerlendirme yöntemleri binaların "Doğrusal Olmayan Tepki Geçmiş Analizi (Nonlinear Response History Analysis - NRHA)" sonuçları temel alınarak yürütülmektedir. Detaylı performans değerlendirme yöntemleri, bu çalışmanın temelini oluşturan doktora çalışmasında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Dilsiz, 2013).

Zaman Uzayında Doğrusal Olmayan Tepki Hesabının (NRHA) karmaşıklığı göz önüne alındığında, yapılarıdaki doğrusal olmayan deprem davranışını belirlemek için onun yerini tutmak üzere başka doğrusal ve doğrusal olmayan analiz yöntemi önerilmiştir. Bunlar arasında, ayrıntılı model ve hesaplamalar gerektirmeyen "ön değerlendirme yöntemleri" ve doğrusal olmayan bina davranışı açısından pratik bir araç olarak "pushover" analizine dayalı Doğrusal Olmayan Statik Prosedürler (NSP) ön plana çıkmıştır. Bu analiz prosedürlerinin temel amacı, belirli bir performans hedefi doğrultusunda uygun bir yapısal tasarım için yeterli bilgi seviyesine ulaşmaktır. Ele alınan meselenin tabiatı icabı varılan sonuçların hepsi elastik sınırın ötesindedir.

NRHA sonuçları, sismik davranış açısından "kesin sonuçlar" olarak kabul edilseler de, NSP'ler ile de doğrusal olmayan davranış makul bir şekilde tahmin edebilir. Bununla birlikte, önerilen tüm doğrusal olmayan analiz prosedürleri, sismik talebin tam olarak tahmin edilmesinde kullanılan yaklaşım ve basitleştirmeler nedeniyle sınırlamalara sahiptir. Ayrıca, beklenen depremin maksimum deformasyon talebinin belirlenmesi de doğrusal olmayan statik analiz probleminin bir başka zorluğudur. Binaların performans değerlendirmesi için NRHA yanında, başlıca şu NSP analiz prosedürleri kullanılmaktadır: ATC-40 (ATC, 1996), FEMA-356 (ASCE, 2000), FEMA-440 (ATC, 2005)

NSP'leri, Eşdeğer SDOF Sisteminin Doğrusal Olmayan Analizi (Fajfar ve Fischinger, 1987), ve Değiştirilmiş Modal Pushover Analizi (MMPA) (Chopra vd., 2004).

Analiz sonuçlarının hesaplanması ve işlenmesi için harcanan yüksek çaba, yapılması gereken kabuller ve bu nedenle yaklaşık sonuçların elde edilebilmesi de göz önünde bulundurularak, binaların genel performansları, ön değerlendirme prosedürleri kullanılarak da değerlendirilebilmektedir. Hassan ve Sözen (1997) ve bunu destekleyen Gülkan ve Sozen (1999), Yakut (2004) ve Özcebe vd. (2004) tarafından önerilen ön değerlendirme prosedürleri literatürde yer alan ve Türkiye bina envanteri için kullanılmış bazı ön değerlendirme yöntemleridir.

Bu çalışma, belirli yer hareketlerinden kaynaklanan yapısal tepkinin araştırılması için NRHA tabanlı detaylı değerlendirme yöntemleri ile ön değerlendirme yöntemlerine odaklanmıştır. Ana amaç, saha gözlemleri temelinde binaların gözlemlenen performansının bu yöntemlerle yapılan tahminlerle karşılaştırılmasıdır. Performans değerlendirme yöntemlerinin bina ölçeğindeki genel performansı, 1999 Marmara Depremi (M7.4) sırasında Adapazarı şehir merkezinde seçilen yapılar için gerçekleştirilen "tersine hesaplamalar" ve bina hasar gözlemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizlerde, sahada kaydedilen yer hareketi verisi girdi olarak kullanılmıştır. Bu çalışma, deprem performansını değerlendirmek için geliştirilen yöntemlerin kendilerinin yeterince performans göstermediği sürece, bu yöntemlerin faydasını yeniden değerlendirmeyi gerekli kılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, Adapazarı şehir merkezinde ve birbirine oldukça yakın olan, orta derecede ve ağır hasar görmüş ikişer bina, Adapazarı Belediyesi arşivlerinden seçilmiştir. Depremde ortaya çıkan genel hasar durumları bilinen binaların, detaylı değerlendirme ve ön değerlendirme yöntemlerine kullanılarak yapılan analiz tahminleriyle karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu şekilde, değerlendirme yöntemlerinin genel hasarı uygun şekilde tahmin edip etmedikleri kontrol edilmiştir.

Çalışmada binalar, EuroCode-8-3 (EC, 2005), Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) yönetmeliklerinin ayrıntılı doğrusal olmayan dinamik değerlendirme prosedürleri kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışmada yönetmeliklerin önerdiği doğrusal değerlendirme prosedürleri dikkate alınmamıştır.

Analiz sonuçlarının hesaplanması ve işlenmesi için harcanan çaba göz önünde bulundurularak, binaların genel sismik performansı, Hassan ve Sözen (1997), Yakut (2004) ve Özcebe vd. (2004) tarafından önerilen ön değerlendirme prosedürleri kullanılarak da değerlendirilmiştir. Tüm sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

## 2. Binaların Tanımı ve İlgili Hasar

Adapazarı (Sakarya), 17 Ağustos 1999 Marmara Depremi sırasında en çok etkilenen şehirlerden biri olmuştur. Bu nedenle, Dilsiz (2013) tarafından çalışma alanı olarak seçilmiştir. Toplamda on hasarlı bina ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Bu makalede, bu binalardan Adapazarı şehir merkezinde yer alan ve orta derecede hasar görmüş iki bina ile ağır hasar görmüş iki bina sunulmaktadır. İncelenen on binadan altısı için yapı malzemelerinin tasarım dayanım değerleri mevcut olup, bu değerlerin tüm binalar için aynı olduğu varsayılmıştır.

Ülkemizdeki betonarme binaların genel özelliklerini temsil etmek amacıyla, düşey ve planda düzensizliklere sahip ve malzeme kalitesi açısından benzer eksiklikleri bulunan binalar seçilmiştir. Bununla birlikte, ele alınan binalar, genel bina envanteri için geçerli olan ortalama malzeme kalitesine sahiptir. Tüm binaların yapısal sistemi betonarme çerçeve sisteminden oluşmaktadır. Adapazarı havzasındaki yüksek yer altı su seviyesi sebebiyle, örnek binalar için zemin seviyesinin altında bir bodrum kat inşa edilmemiştir.

**Tablo 1.** Seçilen binalar hakkında genel bilgiler

	Bina No	Mahalle	Pafta	Ada	Yapım Yılı	Kat Sayısı	Beton $f_{cd}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Çelik $f_{yd}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Oturum Alanı (m <sup>2</sup> m)
Orta	1	Yahyalar	6	72		4			22 * 17
Hasar	2	Tekeler	107	783	1994	5	95	1910	11,5 * 16,5
Ağır	3	Semerciler	54	388	1990	5			11,5 * 9,7
Hasar	4	İstiklal	15	607	1987	5			8,8 * 12,1

Seçilen binalar hakkında genel bilgiler tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'in ikinci sütununda verilen bina kimlik numaraları, yazının geri kalanında seçilen binalar için referans tanımlama numaraları olarak kullanılacaktır.

Adapazarı bölgesindeki malzeme ve inşaat kalitesinin düşük olduğu görülmüştür. Alınan karot numuneleri üzerindeki testlere göre, betonun ortalama basınç dayanımı projelerde kullanılan değerlere göre yüzde 25 daha düşük rapor edilmiştir (Yakut vd., 2006). Beton

dayanımı, modelleme ve inşaat eksiklikleri ile mevcut verilerin güvenilirliği gibi sınırlı bilgiler göz önüne alındığında, bu çalışmada betonun basınç dayanımı ( $f_{cd}$ ) ve donatı çeliğinin çekme dayanımı ( $f_{yd}$ ) için tasarım değerleri kullanılmıştır. Bu varsayım, bölgedeki malzeme kalitesini dikkate alan çalışmalarla tutarlıdır. Beton ve donatı çeliği için tasarım dayanım değerleri sırasıyla 9,5 MPa ( $f_{cd} = f_{ck} / 1,5$ ) ve 191 MPa ( $f_{yd} = f_{yk} / 1,15$ ) olarak verilmiştir.

**Tablo 2.** Seçilen binalar hakkında geoteknik bilgiler

	Bina No	Anakaya Derinlik (m)	NEHRP Zemin Sınıfı	DBYBHY Zemin Sınıfı	Faya Uzaklık (km)	PGA (g)	$V_s$ (m/s)	T (s) Hakim Per.	Yeraltı Su Seviyesi (m)	Sıvılaşma Şiddet İndeksi
Orta	1	175	E	Z3	12	<0,21	<263	0,82-1,23	0 - 5	2
Hasar	2	150	E	Z4	13,7	<0,21	<263	<0,82	> 15	0
Ağır	3	175	E	Z3	12	<0,21	263-371	>1,23	0 - 5	2
Hasar	4	175	E	Z4	12,1	<0,21	<263	<0,82	0 - 5	5

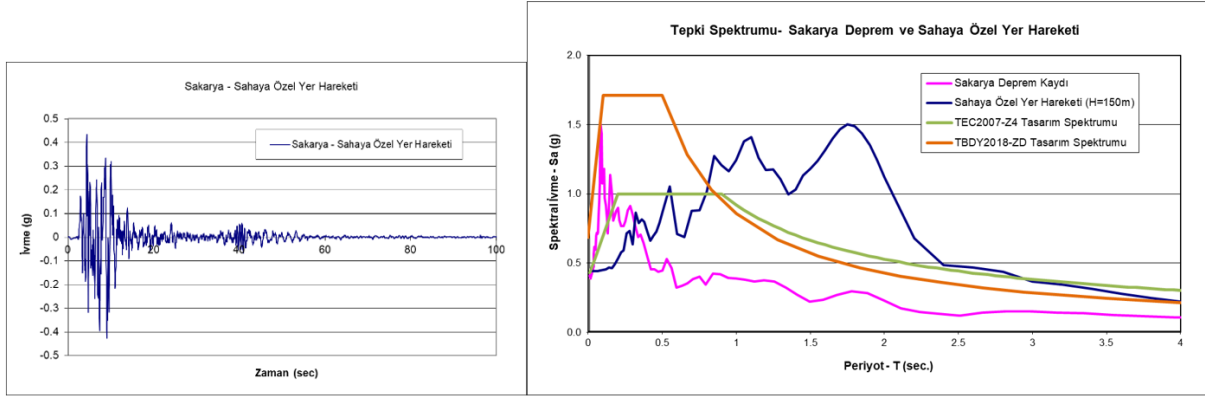
İncelenen binalara ait geoteknik veriler, bölge için yapılan Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) çalışmasından ayıklanarak (Dilsiz, 2013) tablo 2'de sunulmuştur. Binaların bulunduğu yerlerdeki ana kaya derinliği 150 m ile 175 m arasında değişmektedir. Bu konumlardaki yumuşak zeminler, NEHRP'ye göre E sınıfı, Deprem Yönetmeliği'ne (DBYBHY, 2007) göre ise Z3 veya Z4 olarak sınıflandırılmıştır. Yumuşak zemin özellikleri nedeniyle bu alanlarda düşük kayma dalgası hızları ( $V_s$ ) ve uzun hâkim periyot değerleri gözlemlenmiştir. Tablo 2'nin son sütununda yer alan Sıvılaşma Şiddeti İndeksi (LSI) değerlerinin artışı, artan sıvılaşma riskini göstermektedir ve bu değerler 0 ile 10 arasında ölçeklendirilmiştir. Bununla birlikte, bu binalar için herhangi bir zemin kayması rapor edilmediği için sıvılaşma riski orta veya düşük olarak değerlendirilmiştir.

## 3. Sahaya Özgü Türetilmiş Yer Hareketi

Binaların çok büyük ölçekli bir testi, önceden planlanmamış olsa da 17 Ağustos 1999 tarihinde meydana gelen Marmara Depremi sırasında gerçekleşmiştir.  $M_w$  7,4 büyüklüğündeki deprem, Türkiye'nin Marmara Bölgesi'ni vurmuş, çok sayıda bina hasar görmüş ve on binlerce insan hayatını kaybetmiştir. Adapazarı şehir merkezine en yakın olan Sakarya istasyonunda, Marmara Depremi'nin ana şokuna ait yatay doğu-batı (kabaca faya paralel) bileşeni ve düşey bileşeni kaydedilmiştir. Yatay doğu-batı bileşeni için maksimum yer ivmesi (PGA) 0,41g, maksimum yer hızı (PGV) 81 cm/s ve maksimum yer değiştirme 220 cm olarak ölçülmüştür (Sancio vd., 2002). Ancak, depremin kuzey-güney (faya dik) bileşeni, cihaz arızası nedeniyle kaydedilememiştir. Deprem sırasında Sakarya istasyonunun bulunduğu (şehir merkezi) faya daha yakın

olan mahallede hasar yoğunluğu düşük olmuştur. Ancak, esas yıkım, fay kırığının yaklaşık 7-8 km kuzeyinde, yumuşak zeminler üzerinde bulunan Adapazarı şehir merkezinde gözlemlenmiştir. Bu bölgede herhangi bir kayıt cihazı ise bulunmamakta idi. Adapazarı havzasındaki farklı alüvyon tabakalarının

derinlikleri için Bakır vd. (2002) tarafından, Sakarya kayıtlarının doğu-batı bileşeni kullanılarak yerel zemin hareketi kaydı geliştirilmiştir. 150 m kalınlığında yumuşak zemin için elde edilmiş olan bu yer hareketi, bu çalışmada değerlendirilen binaların analizinde kullanılmıştır.



**Şekil 1.** Sahaya özgü türetilmiş yer hareketi ve tepki spektrumu (orijinal kayıt tepki spektrumu ve DBYBHY-2007 (Z4) ve TBDY-2018 (ZD) tasarım spektrumları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir).

Tüm binaların analizlerinde kullanılan türetilmiş yer hareketi kaydı ve yüzde 5 sönüm için karşılık gelen tepki spektrumu şekil 1'de gösterilmiştir. Burada, yer hareketi tepki spektrumu, orijinal yer hareketi tepki spektrumu, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018'in tasarım spektrumları ile karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, DBYBHY-2007 için Z4 yerel zemin sınıfı ve TBDY-2018 için de deprem kaydının alındığı Sakarya istasyonunun konumu ile ZD yerel zemin sınıfı kullanılarak tasarım spektrumları elde edilmiştir.

#### 4. Bina Modelleri

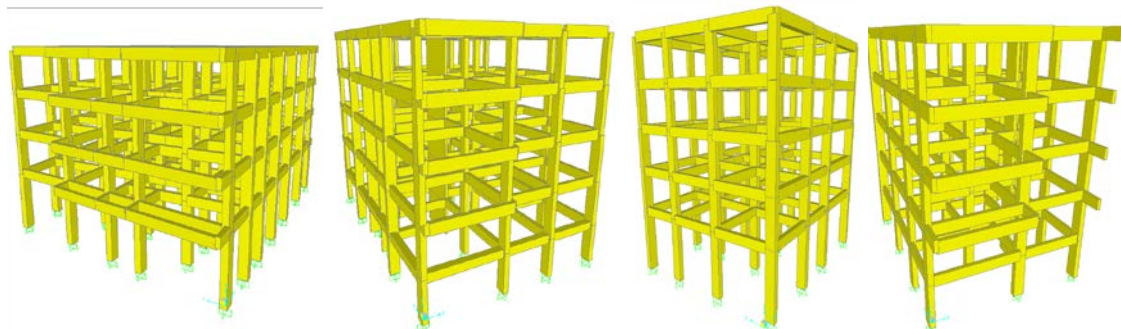
Adapazarı şehir merkezinden seçilen hasarlı binaların bilgisayar modelleri, projeden elde edilen bilgilerin mevcut yapıyı temsil ettiği varsayılarak oluşturulmuştur. Bu varsayım, daha sonra güçlendirilmiş orta derecede hasar görmüş binalar üzerindeki yazar gözlemleriyle uyumludur. Bina planlarının ve düşey boyutlarının yanı sıra yapısal elemanların boyutlarının projelere uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Seçilen binaların analitik modelleri, deprem mühendisliği uygulamalarında kullanılan açık kaynak bir yazılım olan OpenSees programı kullanılarak oluşturulmuştur (OpenSees, 2010). Doğrusal olmayan analizler ve yapıların sismik tepkisini simüle etmek için bu yazılım

kullanılmıştır.

Kirişler ve kolonlardan (ve varsa perde duvarlardan) oluşan betonarme çerçeve sistemler, OpenSees kütüphanesindeki "uç noktalarında mafsallı kiriş elemanı" (beam with hinges element) kullanılarak modellenilebilir. Bu tür elemanlar, elemanı, iki uçta mafsallı (konsantre plastiklik) ve ortada doğrusal-elastik bir bölge olacak şekilde üç kısma ayırır. Mafsallar, önceden tanımlanmış bir kesit ataması yapılarak tanımlanır. Her bir mafsallın uzunluğu da belirtilir. Kiriş-mafsallı elemanların modellenmesinde yapısal bileşenlerin doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon ilişkilerinin atanması için lif (fiber) kesitler kullanılmıştır. Böylece kirişlerin ve kolonların iki eksenli eğilme davranışı temsil edilmiştir.

Beton ve donatı çeliği için sırasıyla Kent-Scott-Park beton modeli (Kent ve Park, 1971; Scott vd., 1982) Chang ve Mander (1994) tek eksenli çelik modelleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizlerde, yapı elemanlarının yük-deformasyon ilişkisi de doğrusal olmayan modeller ile temsil edilmelidir (ASCE, 2008). Bu çalışmada da yapı elemanları doğrusal olmayan yük-deformasyon ilişkileri kullanılarak modellenmiş ve doğrusal olmayan analizler için çatlamamış kesitler kullanılmıştır.



**Şekil 2.** Bina modellerinin 3D görünüşleri (sırasıyla 1-4 numaralı binalar).

Binaların 3D modellerinde, binalarda pencere veya kapı açıklıkları bulunmayan düzenli ve sürekli duvarların az miktarda olması göz önünde bulundurularak dolgu duvarlar ihmal edilmiştir (Yakut, 2004). Bu modellerle ilgili diğer varsayımlar şunlardır: her bina için kat seviyeleri için rijit diyafram varsayımı uygulanmıştır, kiriş modelleri için güvenli tarafta kalmak amacıyla etkin kanat genişliği dikkate alınmamıştır, P - Δ etkileri göz önüne alınmamıştır ve NRHA için yüzde 5 Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Oluşturulan analitik modellerin 3D görünümü şekil 2'de gösterilmiştir.

### 5. Doğrusal Olmayan Tepki Geçmiş Analizi (NRHA) Sonuçları

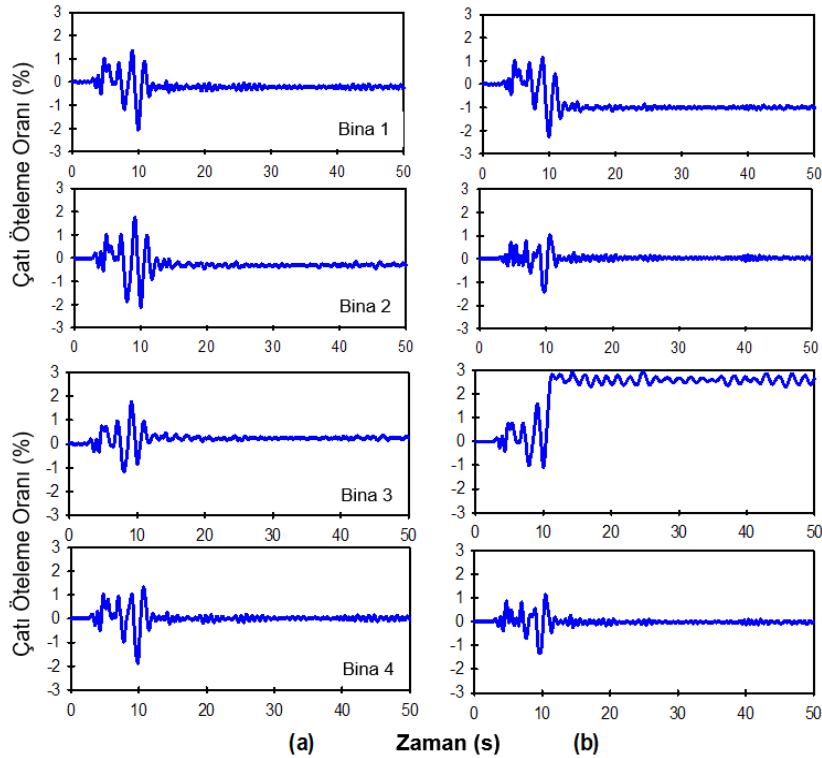
Bu çalışmada ele alınan her bina için, güçlü yer hareketinin yalnızca bir bileşeni (doğu-batı yönü) mevcut olduğundan, NRHA analizleri binaların plan düzlemindeki her bir ortogonal yönünde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Binalar için bina toplam yüksekliğine göre normalize edilmiş çatı öteleme oranı için zaman

geçmiş sonuçları şekil 3'te gösterilmiştir. NRHA sırasında elde edilen (bina ağırlığına göre normalize edilmiş) toplam taban kesme kuvveti ile çatı öteleme oranı arasındaki kuvvet-deformasyon grafikleri şekil 4'te verilmiştir. Her bina için NRHA sırasında hesaplanan maksimum çatı deplasmanı ve toplam taban kesme kuvveti değerleri tablo 3'te sunulmuştur. Tablo 3'te ayrıca, küresel deplasman oranları (maksimum çatı deplasmanının bina toplam yüksekliğine oranı) ve normalize edilmiş taban kesme kuvveti değerleri (maksimum taban kesme kuvvetinin bina toplam ağırlığına oranı) verilmiştir.

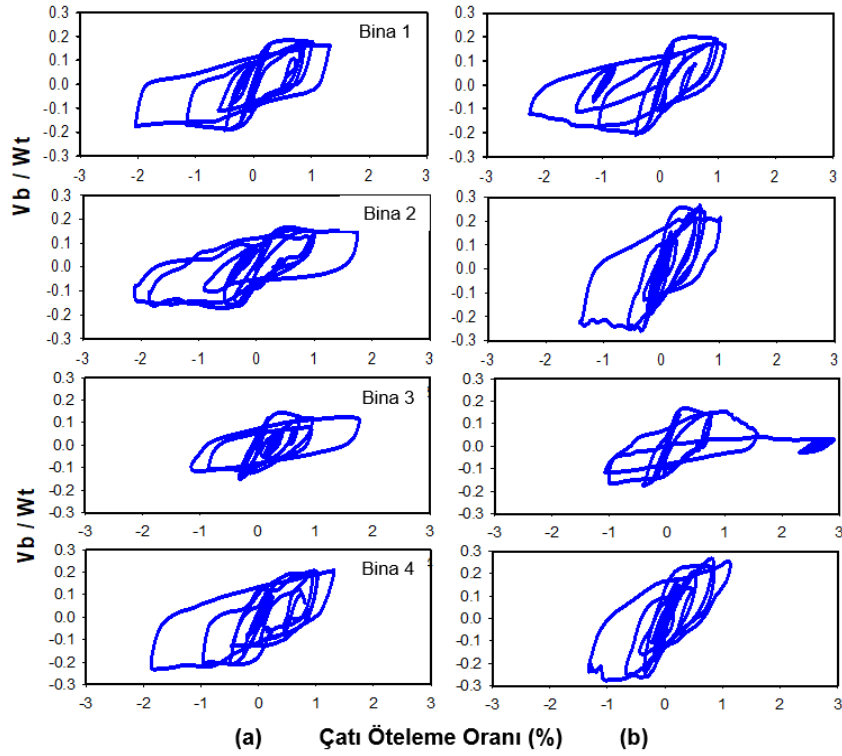
X yönündeki analizlerde, maksimum çatı öteleme oranı Bina 1 için yüzde 2,04 ve Bina 2 için yüzde 2,09 olarak elde edilmiştir. Genel olarak, daha büyük yanıl çatı öteleme değerleri orta derecede hasar görmüş binalar için elde edilmiştir. Daha büyük çatı öteleme kapasitesine sahip binalar, daha iyi performans göstermiş ve deprem sırasında daha az hasar almıştır.

**Tablo 3.** Hesaplanan ve normalize edilmiş NRHA sonuçları

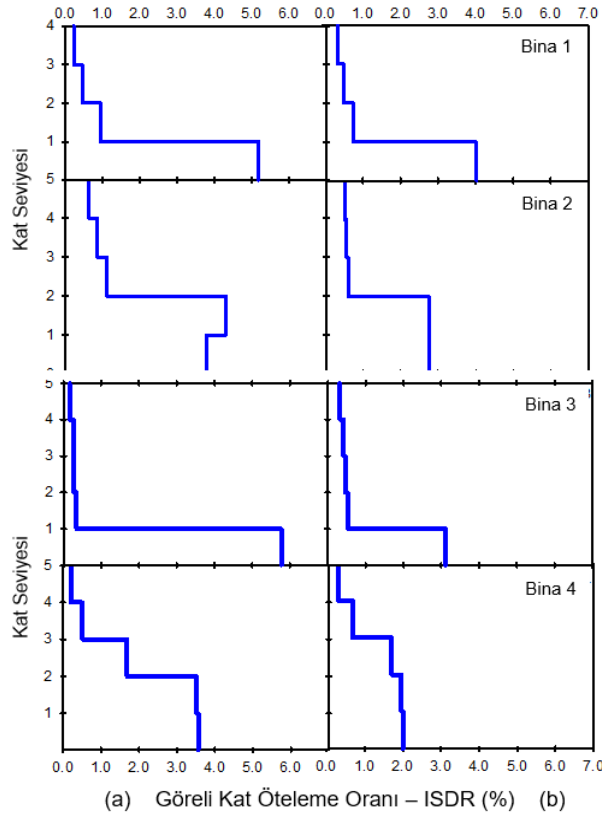
	Bina No	Yön	H <sub>T</sub> (m)	W <sub>T</sub> (kN)	Δr (m)	V <sub>b</sub> (kN)	Çatı Ötelemesi (%)	V <sub>b</sub> / W <sub>T</sub>
Orta Hasar	1	X	12,4	16566	0,2531	2903,3	2,041	0,175
		Y			0,2040	2452,4	1,645	0,148
Ağır Hasar	2	X	13,6	11775	0,2848	1608,8	2,094	0,137
		Y			0,1912	2645,1	1,406	0,225
Ağır Hasar	3	X	15,4	7511	0,2723	830,8	1,768	0,111
		Y			0,1780	912,7	1,156	0,122
Ağır Hasar	4	X	13,5	7082	0,2519	1455,0	1,866	0,205
		Y			0,1782	1600,5	1,320	0,226



**Şekil 3.** Normalleştirilmiş çatı öteleme oranları, (a) X yönü ve (b) Y yönü.



Şekil 4. Normalleştirilmiş taban kesme kuvveti – çatı ötelenmesi grafikleri, (a) X yönü ve (b) Y yönü.



Şekil 5. Göreli kat ötelenme oranları (NRHA), (a) X yönü ve (b) Y yönü.

Tablo 3'te de görüldüğü üzere ağır hasar görmüş binaların hiçbiri yüzde 2'nin üzerinde çatı seviyesi öteleme oranına ulaşmamıştır. Küresel çatı öteleme oranları açısından bakıldığında, orta derecede hasar görmüş binaların ağır hasar görmüş binalara kıyasla

daha ciddi hasar almış olması beklenir ki bu, gözlemlenen genel hasarla tutarlı değildir.

Her bina için göreli kat ötelenme oranları (interstory drift ratio – ISDR) da incelenmiştir. Binaların yükseklikleri boyunca kat ötelenmesi oranlarının

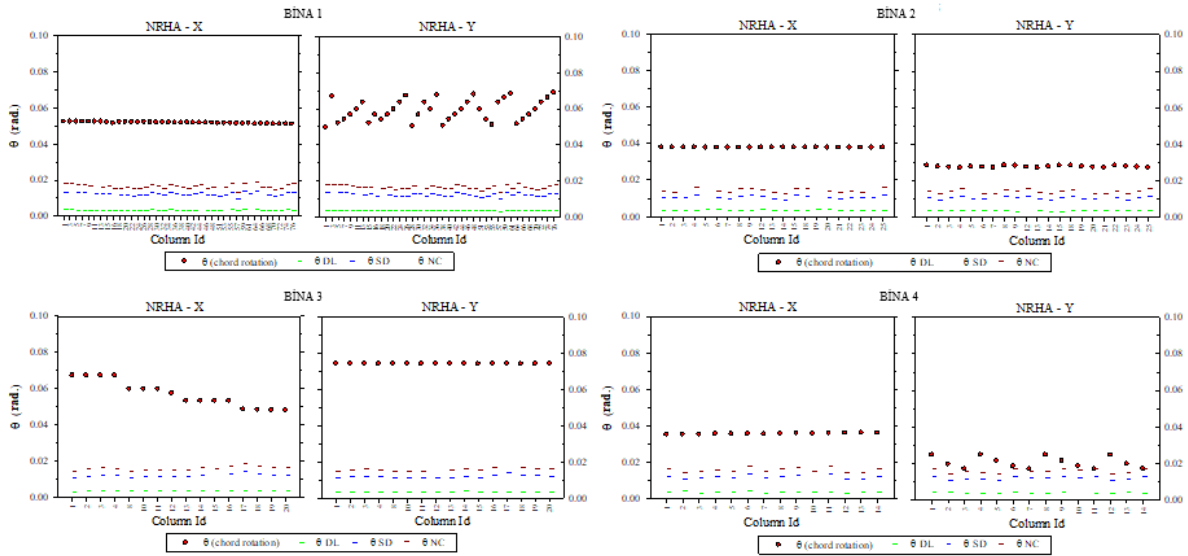
dağılımları şekil 5'te sunulmuştur. X yönünde, Bina 1 ve Bina 3'ün zemin katlarında yüzde 5'in üzerinde maksimum ISDR değerleri elde edilmiştir. Genel olarak, analiz sonuçlarına göre binalarda "yumuşak kat" davranışı gözlemlenmiştir.

## 6. Binaların Ayrıntılı Değerlendirilmesi

Yukarıda verildiği üzere, NRHA sonuçlarına dayalı olarak yapılan genel değerlendirmenin ardından, binalar ayrıca ASCE/SEI-41/06 (ASCE, 2007) ve Supplement-1 (ASCE, 2008), EuroCode-8-3 (EC, 2005) ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) kapsamında ayrıntılı değerlendirme usulleri kullanılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Dilsiz, 2013). Bu ayrıntılı değerlendirme, özellikle bina ölçeğinde gerçekleştirilen değerlendirme sonuçlarının belirsiz olduğu durumlarda yapısal elemanlar seviyesindeki deprem tepkisini belirlemek için gereklidir. Tüm yönetmeliklerin sonuçları arasında küçük farklılıklar

olmakla birlikte, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma kapsamında ise yine NRHA sonuçlarına dayalı olarak, EuroCode-8-3 (EC, 2005) ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) yanında, daha sonra güncellenmiş bulunan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) ile verilen doğrusal olmayan değerlendirme prosedürleri kullanılarak yapılan ayrıntılı değerlendirme sonuçları özetlenmiştir.

Bu kapsamda, binaların tüm kat ve kolonları ayrıntılı yöntemler kullanılarak değerlendirilmiş olmakla birlikte, ayrıntılı değerlendirme sonuçlarının incelenmesiyle belirlenen en kritik kat (zemin kat) için elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur. EuroCode-8-3'a göre ayrıntılı değerlendirmede, kritik kattaki kolonların eksen dönmesi (chord rotation -  $\theta$ ) talepleri, NRHA analizleriyle hesaplanmış ve Sınırlı Hasar (Damage Limitation -  $\theta_{DL}$ ), Kontrollü Hasar (Significant Damage -  $\theta_{SD}$ ) ve Göçme Öncesi (Near Collapse -  $\theta_{NC}$ ) hasar durumu sınırları ile karşılaştırmalı olarak şekil 6'da verilmiştir.



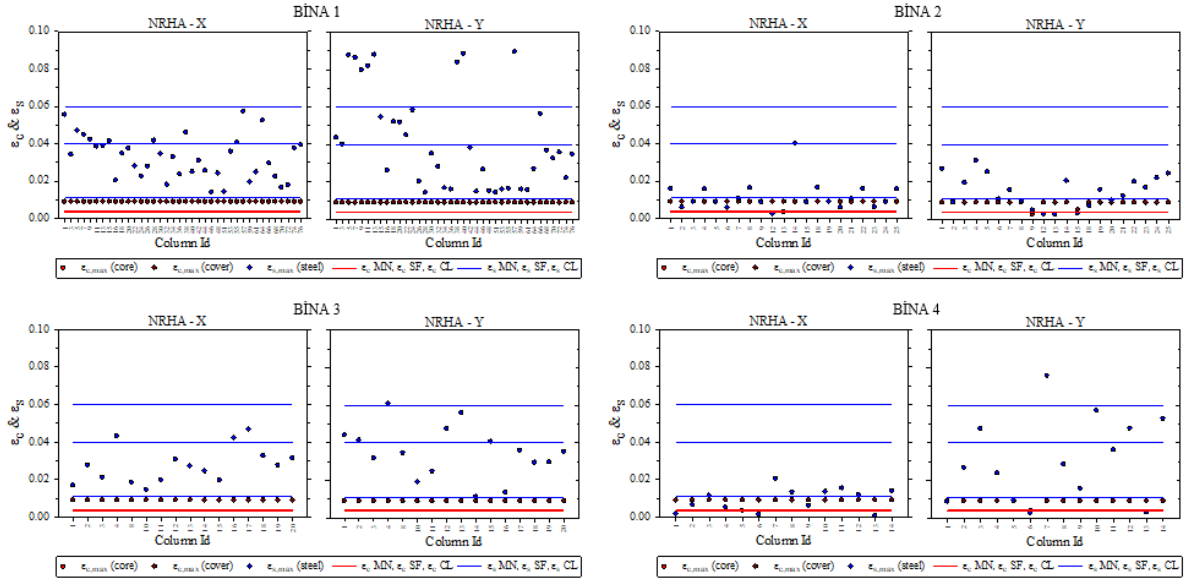
Şekil 6. 1 – 4 numaralı binalar için NRHA ile elde edilen X ve Y yönü eksen dönmesi ( $\theta$ ) sonuçları ile EuroCode-8-3 sınır değerleri karşılaştırması.

Yapısal eleman üzerindeki aksenal kuvvet ve kesme kuvveti seviyelerine, enine donatı oranına ve ayrıca plastik mafsallı boyu ve moment kapasitesine bağlı olarak her bir eleman için farklı hasar durumu sınırları grafiklerde gösterilmiştir. Analizlerde hesaplanan  $\theta$  talebi değerinin  $\theta_{NC}$  sınırını aşması durumlarında kolon "göçmüş" olarak kabul edilmiştir.

EuroCode-8-3'in ayrıntılı değerlendirme sonuçlarına göre, az sayıda bazı kolonlar daha az hasar almış olsa da, orta derecede hasar görmüş binalar veya ağır hasar görmüş binaların tamamı "göçmüş" olarak işaretlenmiştir. Diğer bir deyişle, özellikle orta derecede hasar görmüş binalar için binaların genel hasar durumu ayrıntılı değerlendirme tarafından daha ileri (ağır hasarlı / göçmüş) düzeyde tahmin edilmiştir.

Türk Deprem Yönetmeliklerine (gerek DBYBHY-2007 ve

gerekse TBDY-2018) göre mevcut binaların ayrıntılı değerlendirilmesi, beton ve donatı çeliğinde meydana gelen birim şekil değiştirme değerleri esas alınarak yapılmaktadır. DBYBHY-2007'ye göre ayrıntılı değerlendirmede, kritik kattaki kolonlarda beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirme ( $\epsilon_c$  ve  $\epsilon_s$ ) talepleri, NRHA analizleriyle hesaplanmış ve Minimum Hasar Sınırı ( $\epsilon_{cu,MN}$  ve  $\epsilon_{s,MN}$ ), Güvenlik Sınırı ( $\epsilon_{cg,GV}$  ve  $\epsilon_{s,GV}$ ) ve Göçme Sınırı ( $\epsilon_{cg,GC}$  ve  $\epsilon_{s,GC}$ ) değerleri ile karşılaştırmalı olarak şekil 7'de verilmiştir. Burada minimum hasar sınırı için beton kesitinin en dış lifindeki birim şekil değiştirme değeri kullanılırken, diğer sınırlar için etriye içindeki bölgenin en dış lifi dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada değerlendirmesi yapılan mevcut binalarda sargı etkisinin yetersiz oluşu dikkate alınarak, sınır değerleri sargı etkisini ihmal ederek hesaplanmıştır.



Şekil 7. 1 – 4 numaralı binalar için NRHA ile elde edilen X ve Y yönü beton ve donatı birim şekil değiştirme ( $\epsilon_c$  ve  $\epsilon_s$ ) sonuçları ile DBYBHY-2007 sınır değerleri karşılaştırması.

Tablo 4. DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerine göre performans düzeylerine göre birim şekil değiştirme sınır değerleri

	DBYBHY 2007		AFAD 2018	
Beton	$(\epsilon_{cu})_{MN} = 0,0035$	Minimum Hasar	$\epsilon_c^{(SH)} = 0,0025$	Sınırlı Hasar
	$(\epsilon_{cg})_{GV} = 0,0035$	Güvenlik	$\epsilon_c^{(KH)} = 0,0026$	Kontrollü Hasar
	$(\epsilon_{cg})_{GC} = 0,004$	Göçme	$\epsilon_c^{(GÖ)} = 0,0035$	Göçmenin Önlenmesi
Çelik	$(\epsilon_s)_{MN} = 0,010$	Minimum Hasar	$\epsilon_s^{(SH)} = 0,0075$	Sınırlı Hasar
	$(\epsilon_s)_{GV} = 0,040$	Güvenlik	$\epsilon_s^{(KH)} = 0,024$	Kontrollü Hasar
	$(\epsilon_s)_{GC} = 0,060$	Göçme	$\epsilon_s^{(GÖ)} = 0,032$	Göçmenin Önlenmesi

DBYBHY-2007'ye göre ayrıntılı değerlendirme sonuçları incelendiğinde, EuroCode-8-3 sonuçlarında olduğu gibi, bazı kolonlarda beton ya da donatı çeliği deformasyonları açısından daha az hasarlı durumlar gözlenmekle birlikte, orta derecede hasar görmüş binalar veya ağır hasar görmüş binaların tamamı "göçmüş" olarak değerlendirilmektedir. Yine, orta derecede hasar görmüş binalar için binaların genel hasar durumu ayrıntılı değerlendirme tarafından daha ileri düzeyde tahmin edilmiştir.

Mevcut binaların değerlendirilmesi yöntemi TBDY-2018'de güncellenmiştir. Bu çalışmada gerek önceki gerekse yeni yönetmeliklerce verilen yöntemler tüm detayları ile verilmemiş olmakla birlikte, iki yönetmeliğin performans seviyeleri için ele aldığı sınır değerleri karşılaştırmalı olarak tablo 4'de özetlenmiştir. TBDY-2018'de performans düzeyleri az hasardan yüksek hasara doğru "sınırlı hasar (SH)", "kontrollü hasar (KH)" ve "göçmenin önlenmesi (GÖ)" düzeyleri olarak verilmektedir. Bu karşılaştırmada, yine binalardaki sargı etkisinin yetersizliği nedeniyle, performans limit değerleri -önceki yönetmeliklerde olduğu gibi- en olumsuz durumları verecek varsayımlar ile sargı etkisini ihmal ederek (sargısız beton) hesaplanmıştır. Burada şu hususa da dikkat çekmek gerekir ki, TBDY-2018'de bu çalışmada değerlendirilen binalarda kullanılmış olan S220 donatı çeliğine yer verilmezken, B420C ve B500C

nervürlü donatı çeliğinin kullanılacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla performans düzeylerinin sınır değerleri de buna göre hesaplanmaktadır. Bununla beraber, S220 donatı çeliği yeni yönetmelikte kullanılan diğerlerine göre daha sünek bir malzeme olduğundan, yönetmelikte verilen sınır değerlerinin kullanılması, bu çalışmada ele alınan binaların değerlendirilmesinde güvenli tarafta kalınmasını sağlamaktadır.

TBDY-2018 ile verilen hasar sınırlarının DBYBHY-2007'den daha düşük olduğu açıkça görülmektedir. Değerlendirilen binalarda kritik kat kolonlarında NRHA analizleriyle hesaplanmış beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirme ( $\epsilon_c$  ve  $\epsilon_s$ ) talepleri, bu sınır değerleri ile karşılaştırıldığında da binaların "göçmüş" olarak belirleneceği aşikârdır. Orta hasarlı ya da ağır hasarlı binaların tamamı için aynı sonuç elde edilmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmamız, incelenen binaların deprem sonrası gerçek hasar durumlarının, özellikle orta derecede hasar görmüş binalar için hem bina düzeyinde ve hem de eleman ölçeğindeki ayrıntılı değerlendirme sonuçlarıyla uyumlu olmadığını ortaya koymuştur.

## 7. Binaların Basit Değerlendirme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi

Gerçek hasar durumları elde edilemediği ve hiçbir ayrıntılı değerlendirme prosedürü ile binalar doğru şekilde nitelendirilemediği için, analiz sonuçlarının

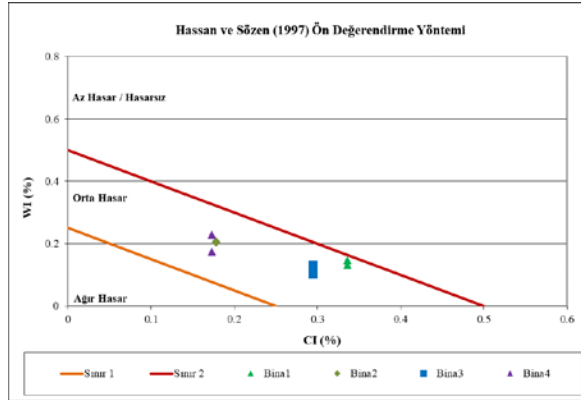


hesaplanması ve işlenmesi için harcanan yüksek çaba da göz önüne alınarak, binaların genel sismik performansı ön değerlendirme prosedürleri ile değerlendirilmiştir. Ön değerlendirme prosedürlerinin temel amacı, hasar görme riski yüksek olan binaları çabukça tespit etmektir.

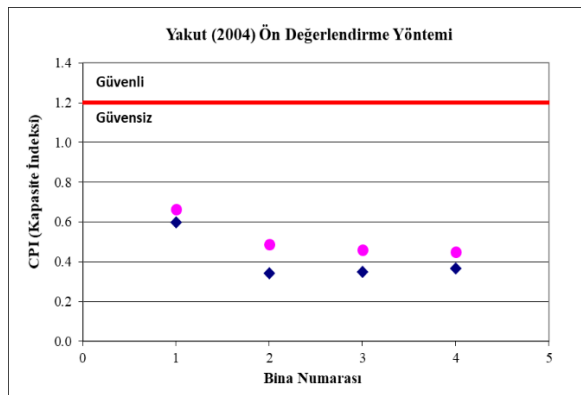
Bu çalışmadaki binalar, Hassan ve Sözen (1997), Yakut (2004) ve Özcebe vd. (2004) tarafından önerilen ön değerlendirme prosedürleri kullanılarak, mevcut yer hareketi etkileri altında olası performanslarını belirlemek amacıyla değerlendirilmiştir. Bu prosedürler ilgili atıflarda mevcut olduğu için burada detaylı olarak açıklanmamış, yalnızca sonuçlar şekil 8, şekil 9 ve tablo 5'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Özcebe vd. (2004) ön değerlendirme yöntemi ile performans tahmin sonuçları

Bina	Performans Tahmini
1	Orta düzey deprem riski
2	Orta düzey deprem riski
3	Ağır deprem riski
4	Ağır deprem riski



**Şekil 8.** Hassan ve Sözen (1997) ön değerlendirme yöntemleri ile performans tahmin sonuçları.



**Şekil 9.** Yakut (2004) ön değerlendirme yöntemleri ile performans tahmin sonuçları.

Bu ön değerlendirme yöntemleri, büyük bina envanterlerini hızlıca sıralamak için birçok önemli yapısal parametreyi ihmal etse de, incelenen binaların risklilik durumları yeteri düzeyde belirlenebilmiştir. Bu grup içindeki binaların sıralaması başarılı olmuştur, çünkü binalar ağır ve orta derecede hasarlı olarak

sınıflandırılabilmiştir. Bu nedenle, özellikle binalarla ilgili güvenilir verilerin eksikliği ve sahadaki beklenen deprem tehlikesi seviyesi durumunda, ön değerlendirmelerin yapılması, incelenen binalar için yeterli olmuştur. Analiz sonuçlarının hesaplanması ve işlenmesi için harcanan yüksek çaba göz önünde bulundurulduğunda, ön değerlendirme prosedürleri pratik bir alternatif olarak görülmektedir.

## 8. Tartışma ve Sonuçlar

Çalışmamız, Türkiye'deki bina stokuna örnekler üzerinde yönetmeliklerce verilen detaylı değerlendirme yöntemlerinin ve riskli yapıların hızlı tespitine yönelik ön değerlendirme yöntemlerinin uygulanmasına odaklanmıştır. Riskli bina stokunun belirlenmesinin ehemmiyeti son yıkıcı depremler ve ortaya çıkardığı yıkım ile bir kez daha görülmüştür. Seçilen binalara, ülkemizdeki betonarme bina envanterinin genel yapısal özelliklerini yansıtan değerlendirme prosedürleri uygulanmış ve deprem sırasındaki genel bina performansı değerlendirilmiştir. Binaların bilinen (deprem sonucu gözlenen) genel hasar durumları, NRHA analizlerinden elde edilen tahminlerle karşılaştırılmıştır.

NRHA sonuçlarına dayalı olarak uygulanan ayrıntılı değerlendirme prosedürleri sonuçları irdelendiğinde, kolonlar için değişen hasar seviyeleri tahmin edilmiş olmasına rağmen, incelenen tüm binalar, gerçek deprem hasar durumlarına bakılmaksızın, EuroCode-8-3, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerinin ayrıntılı değerlendirme prosedürleriyle "ağır hasarlı" veya "göçmüş" olarak değerlendirilmiştir. Bu nedenle, gerçek hasar durumları doğru tahmin edilememiş ve binalar bu ayrıntılı değerlendirme prosedürleri ile risk durumlarına göre gruplandırılmamıştır. Bu muhafazakâr sonuçların, özellikle yetersiz enine donatı koşulları için, yönetmelik sınırlarının yüksek güvenlik paylarıyla ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Bu yüksek güvenlik aralığı, laboratuvar numunelerindeki detayların, yetersiz inşaat uygulamalarını taklit etmek için kasten kötü yapılmadığı sınırlı araştırmalardan kaynaklanmaktadır.

Çalışmada ele alınan ön değerlendirme yöntemleri ise çok daha sınırlı parametre ile ve çok daha hızlı şekilde daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayabilmişlerdir.

Bugüne kadar geliştirilen değerlendirme prosedürleri, laboratuvar ortamındaki test yapıları için yeterince doğru olabilir. Ancak, gerçek binaların özelliklerindeki değişkenlikler ve sahadaki yer hareketi göz önüne alındığında, bu prosedürlerin saha gözlemleriyle hasar beklentilerinin tutarlılığı çok daha düşüktür. Betonarme binaların sismik davranışı hakkında testlerden elde edilen değerli bilgiler, saha verilerinden elde edilen daha fazla bilgiyle desteklenmelidir. Malzeme özelliklerindeki değişiklikler, geometriler, yer hareketi varyasyonları ve diğer birçok parametre nedeniyle saha verileri ile yönergelerde açıklanan değerlendirme prosedürleri arasındaki tutarsızlıklar göz önüne alındığında, bu yöntemlerin tahmin yetenekleri konusunda daha

gerçekçi bir yaklaşıma ihtiyaç olduğu açıktır. Önemli olduğu için altını çizmekte fayda gördüğümüz bir gözlem şudur: Ülkede halen yaygın olarak uygulanmakta olan kentsel dönüşüm programları ve bunların dayandığı hesap yaklaşımları mevcut binaların buldukları mahallerdeki deprem tehlikesi gerçekleştiği takdirde uğrayacakları hasar konusunda mühendise fikir vermektedir. Kullanılan hesap usulleri ele alınan bina sayılarının çokluğu dikkate alınarak mümkün olduğu kadar pratik çerçeve içinde tutulmaktadır. Bir taraftan bina stokunun barındırdığı can ve mal emniyetini tehdit eden örnekleri doğru şekilde ayıklama ihtiyacı, diğer taraftan ise lüzumsuz yere tehlike arz etmeyen binaları boş yere yıkma kararı vermeme gereği kullanılan hesap araçlarının güvenilir olmasını şart koşmaktadır. Bu amacın sağlanması mutlaka gözlemlere dayalı bilgi dağarcığının geliştirilmesine ihtiyaç göstermektedir. Halen Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca bina değerlendirme firmalarına tavsiye edilen yazılımların fiili gözlemlerle daha güvenilir sonuçlar vermesine yönelik kalibrasyon eylemlerine aralık vermeksizin devam edilmelidir.

#### Katkı Oranı Beyanı

Yazarların katkı yüzdeleri aşağıda verilmiştir. Yazarlar makaleyi incelemiş ve onaylamıştır.

	A.D.	P.G.
K	40	60
T	50	50
Y	-	-
VTI	80	20
VAY	50	50
KT	60	40
YZ	70	30
KI	30	70
GR	70	30
PY	-	-
FA	-	-

K= kavram, T= tasarım, Y= yönetim, VTI= veri toplama ve/veya işleme, VAY= veri analizi ve/veya yorumlama, KT= kaynak tarama, YZ= yazım, KI= kritik inceleme, GR= gönderim ve revizyon, PY= proje yönetimi, FA= fon alımı.

#### Çatışma Beyanı

Yazarlar bu çalışmada hiçbir çıkar ilişkisi olmadığını beyan etmektedirler.

#### Etik Onay Beyanı

Bu çalışmada hayvanlar ve insanlar üzerinde herhangi bir çalışma yapılmadığı için etik kurul onayı alınmamıştır.

#### Kaynaklar

AFAD 2023. 6 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş MW 7.7) ve Elbistan (Kahramanmaraş MW 7.6) depremlerine ilişkin ön değerlendirme raporu. Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, ss: 12.  
American Society of Civil Engineers (ASCE). 2000. Prestandard

and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA-356, Washington, USA, pp: 518.  
American Society of Civil Engineers (ASCE). 2007. Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE/SEI-41/06, Virginia, USA, pp: 426.  
American Society of Civil Engineers (ASCE). 2008. Seismic rehabilitation of existing buildings. ASCE/SEI-41/06 Supplement 1, Virginia, USA, pp: 117.  
American Society of Civil Engineers (ASCE). 2023. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. ASCE/SEI 41-23, Virginia, USA, pp: 567.  
Applied Technology Council (ATC). 1996. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. Report No. SSC 96-01, ATC-40, Volume 1-2, California, USA, pp: 608.  
Applied Technology Council (ATC). 2005. Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, ATC-55 Project, California, USA, pp: 390.  
Bakır BS, Sucuoğlu H, Yılmaz T. 2002. An overview of local site effects and the associated building damage in Adapazarı during the 17 August 1999 İzmit EQ. Bull Seismol Soc Am, 92 (1): 509-526.  
Chang G, Mander J. 1994. Seismic energy based fatigue damage analysis of bridge columns: Part I – Evaluation of seismic capacity. NCEER Tech. Rep. 94-0006, NY, USA, pp: 226.  
Chopra AK, Goel RK, Chintanapakdee C. 2004. Evaluation of a modified MPA procedure assuming higher modes as elastic to estimate seismic demands, Earthq Spectra, 20(3): 757-778.  
Dilsiz A. 2013. Assessment of nonlinear static (pushover) analysis procedures using field experience. PhD. Thesis, Civil Engineering Dept., Middle East Technical University, Ankara, Türkiye, pp: 339.  
Dilsiz A, Gunay S, Mosalam K, Miranda E, Arteta C, Sezen H, Fischer E, Hakhamaneshi M, Hassan W, ALhawamdeh B, Andrus S, Archbold J, Arslanturkoglu S, Bektas N, Ceferino L, Cohen J, Duran B, Erazo K, Faraone G, Feinstein T, Gautam R, Gupta A, Haj Ismail S, Jana A, Javadinasab Hormozabad S, Kasalanati A, Kenawy M, Khalil Z, Liou I, Marinkovic M, Martin A, Merino-Peña Y, Mivehchi M, Moya L, Pajaro Miranda C, Quintero N, Rivera J, Romão X, Lopez Ruiz MC, Sorosh S, Vargas L, Velani PD, Wibowo H, Xu S, Yılmaz T, Alam M, Holtzer G, Kijewski-Correa T, Robertson I, Roueche D, Safiey A. 2023. StEER: 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş, Türkiye Earthq seq preliminary virtual reconnaissance rep (PVR). DesignSafe-CI, pp: 144. <https://doi.org/10.17603/ds2-7ry2-gv66>.  
DBYBHY 2007. Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 26454.  
European Committee for Standardization (EC) 2005. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Strengthening and repair of buildings, European Standard, EC-8-3, BS EN 1998-3, Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium, pp: 81.  
Fajfar P, Fischinger M. 1987. Nonlinear seismic analysis of RC buildings: Implications of a case study. European Earthquake Engineering, Bull Earthq Eng, 1: 31-43.  
Gülkan P, Sozen MA. 1999. A Procedure for determining seismic vulnerability of building structures. ACI Struct J, 96 (3): 336-342.  
Hassan AF, Sözen MA. 1997. Seismic vulnerability assessment of low-rise buildings in regions with infrequent earthquakes. ACI Struct J, 94: 31-39.  
Kent DC, Park R. 1971. Flexural members with confined concrete. J Struct Eng (NYYNY), New York, 97(7): 1969-1990.  
OpenSees 2010. Open system for earthquake engineering

- simulation. Version 2.2.1, Pacific Earthquake Engineering Research Center, <http://opensees.berkeley.edu>.
- Özcebe G, Yücemem MS, Aydoğan V. 2004. Statistical seismic vulnerability assessment of existing reinforced concrete buildings in turkey on a regional scale. *J Earthq Eng*, 8 (5): 749-773.
- Sancio RB, Bray JD, Stewart JP, Youd TL, Durgunoglu HT, Önalp A, Seed RB, Christensen C, Baturay MB, Karadayılar T. 2002. Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey. *Soil Dyn Earthq Eng*, 22 (9-12): 1093-1102.
- SBB (TC Cumhurbaşkanlığı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı) 2023. 2023 Kahramanmaraş ve Hatay depremleri raporu. Ankara, Türkiye, pp: 142. URL: <https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2023/03/2023-Kahramanmaraş-ve-Hatay-Depremleri-Raporu.pdf> [erişim tarihi: Aralık 10, 2024]
- Scott BD, Park R, Priestley MJN. 1982. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Struct J*, 79 (1): 13-27.
- TBDY 2018. Türkiye bina deprem yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), Ankara, Türkiye, 30364.
- Yakut A. 2004. Preliminary seismic performance assessment procedure for existing RC buildings. *Eng Struct*, 26 (10): 1447-1461.
- Yakut A, Ozcebe G, Yucemen MS. 2006. Seismic vulnerability assessment using regional empirical data. *Earthq Eng Struct Dyn*, 35: 1187-1202.