



Yüksek Binaların Tekrarlı Deprem Altındaki Davranışı

Dr. Ali Ruzi ÖZUYGUR

aliruzi@gmail.com

14 Mayıs, 2026

- Problem tanımı
- Tekrarlı deprem / Deprem dizisi
- Literatür özeti
- Araştırma boşluğu
- Örnek yüksek bina
- TBDY, performansa dayalı tasarımı
- Doğrusal olmayan modelleme
- Deprem kayıtları
- Analiz sonuçları
- Beton ve donatı davranışı
- Kesme kuvveti büyümesi
- Göreli ötelenme
- Uygulamaya yönelik öneriler

Degrading seismic performance of tall shear wall buildings under earthquake sequences

Ali Ruzi Özüygür 

YPU – Yapı Proje Uygulama Co., İstanbul, Türkiye

Corresponding author: Ali Ruzi Özüygür (email: aliruzi@gmail.com)

Abstract

It is widely recognized that high-seismic regions across the world are frequently affected by repeated earthquakes. The destructive effects of repeated earthquakes have been investigated by many researchers using performance parameters such as residual displacement, inter-story drift, and dissipated energy. In this study, a high-rise reinforced concrete shear wall building with 40 floors above grade, which represents a typical real tall building, is selected as the example building for numerical analyses. Nonlinear response history analyses are performed under different combinations of earthquakes with various spectral acceleration intensities. The analysis results for the tall building under the earthquake sequences indicate that concrete strain governs the seismic performance level of the building, while steel strain consistently meets the immediate occupancy limit. The study concludes that the immediate occupancy threshold, defined by the concrete strain at peak stress, is a critical limit for preventing significant damage under repeated seismic demands.

Key words: earthquake sequences, repeated earthquakes, nonlinear response history analysis, tall buildings, seismic performance

1. Introduction

Tall buildings are a vital component of modern urbanization and showcase advancements in structural engineering and construction technologies. They are designed with sufficient strength to resist significant seismic forces and stiffness to provide adequate serviceability, complying with seismic design codes and other standards and regulations. Seismic design codes, such as ASCE 7 (2017) and the Turkish Building Seismic Code (TBSC 2018), typically adopt a single major seismic event (Di Sarno 2013) as the design-basis earthquake or maximum credible earthquake, neglecting the cumulative damage from aftershocks or successive earthquakes to structural and nonstructural elements. This oversight can lead to degradation in stiffness, strength, and energy dissipation capacity. Therefore, the earthquake resilience of tall buildings, alongside other structures, stands as a critical and challenging frontier in structural engineering, particularly in regions prone to frequent seismic activity.

It is well known that high-seismic regions around the world frequently experience repeated earthquakes and thousands of aftershocks following a major seismic event (Di Sarno 2013). The most recent devastating earthquake sequence occurred in the Kahramanmaraş province of Turkey on 6 February 2023. The first earthquake, with a magnitude of $M_w = 7.7$, struck Pazarcık, Kahramanmaraş, at 04:17:32; the second earthquake, with a magnitude of $M_w = 7.6$, struck Elbistan, Kahramanmaraş, at 13:24:47 local time. The distance between the two districts, Pazarcık and Elbis-

tan, is approximately 90 km. In the same region, a third earthquake with a magnitude of $M_w = 6.4$ struck Yayladağı district of Hatay province on 20 February 2023. Thousands of aftershocks, some reaching moment magnitudes as high as 6.6, followed the consecutive major earthquakes (Fig. 1). Strong ground motions (GMs), with spectral accelerations exceeding the TBSC-based design spectrum, were recorded during the earthquakes. This earthquake sequence resulted in an unprecedented loss of life and extensive damage to building infrastructure in Turkey's history (AFAD 2023).

2. Literature review

Numerous studies have explored the degrading effects of repeated earthquakes on structural systems using both simplified and detailed models. Early investigations, such as those by Amadio et al. (2003) and Hatzigeorgiou and Beskos (2009), Hatzigeorgiou (2010a, 2010b), focused on single-degree-of-freedom systems to evaluate parameters like ductility demand and inelastic displacement under multiple seismic events. While informative, these studies lack the complexity and interaction effects present in real high-rise buildings. Research by Fragiocomo et al. (2004) and Luco et al. (2004) further suggested modifying design parameters or residual capacity assessments following mainshock-aftershock sequences. More advanced works examined multi-degree-of-freedom systems, including

Problemin Tanımı

Mevcut deprem yönetmelikleri ne varsayıyor?

- Tek büyük deprem
- Ana deprem yaklaşımı
- Yapı deprem sonrası “yeniden sıfırlanmış” kabulü

Ancak gerçek:

- Artçı depremler
- Yakın zamanlı ikinci büyük deprem
- Birikmiş hasar
- Rijitlik kaybı
- Enerji tüketim kapasitesi azalması

Çalışmadaki temel soru:

“İlk depremden sonra bina gerçekten aynı bina olarak mı kalıyor?”

T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI
AFET VE ACIL DURUM
YÖNETİM BAŞKANLIĞI

AFAD

Pazarlık (Kahramanmaraş) Depremi
06.02.2023 Pazartesi
04:17:32 (TST)
Mw 7.7

Elbistan (Kahramanmaraş) Depremi
06.02.2023 Pazartesi
13:24:47 (TST)
Mw 7.6

Yayladağı (Hatay) Depremi
20.02.2023 Pazartesi
20:04:27 (TST)
Mw 6.4

<i>Büyüklik (M)</i>	
<3	
3.0-3.9	
4.0-4.9	
5.0-5.9	
6.0-6.9	

Deprem Yüzey Kırığı

Holosen Fayı

Kavaterner Fayı

Olası Kavaterner Fayı veya Çizgisellik

İİ MERKEZİ

OLKE SINIRI

İİ SINIRI

DERE, NEHR, ÇAY

DENİZ, GÖL

TATLIM WGS 1984

PROJEKSİYON: Lambert Konformal Kuvak

Birimsiz Standart Paralel: 36° 30' Kuzey

Birimsiz Standart Paralel: 41° 00' Kuzey

Merkez: Meridyen: 35° 00' Doğu

☐ **Kahramanmaraş**

AFAD Depremi kataloğu (2011-günümü): T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, Çivrilikler, Deprem Kataloğu. <http://deprem.afad.gov.tr/doküman>

Kahramanmaraş TT, Katal R.F., Köle T., Kahraman T., Demirel T.Y., Ergül Arak T., Orak S., Emre O. (2018) Elazığ-Kahramanmaraş çarşaklığı (Mw 6.8) for Turkey and its near vicinity (1900-2012). Bulletin of Engineering Engineering, Vol.10, Issue 1, pp.137-1333, DOI:10.1007/s10181-018-0068-8

Başarı Şişliok, N., Özd, N.M., Aksoy, Y., Özcan, T.Y., Çiğdem, F. (2019) Türkiye ve yakın çevresini kapsayabilen tschardli deprem (M0-1000 MS 1000) Deprem Kataloğu. Türkiye Sismoteknik ve Harita Ajansına Erişim, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Çuk. Yayımlar Serisi-30, Ankara-Türkiye

Emre O., Demirel T.Y., Orak S., Çiğdem T., Ölmek S., Şişliok F., Çiğdem, F. (2019) Türkiye Deprem Kataloğu. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Çuk. Yayımlar Serisi-30, Ankara-Türkiye

NOT: Bu haritada çarşaklı, yer sınırları ve diğer harita verileri MÜHÜR Harita Genel Müdürlüğünden resmi olarak elde edilmiştir. Harita verileri, yerel çarşaklı çarşaklı ve yerel standart dağılımları olarak verimlidir. Harita verileri.

afadbaşkanlığı

Deprem Dizileri Neden Kritik?

Tekrarlı deprem etkileri:

- Beton ezilme birikimi
- Çelikte çevrimsel hasar
- Rijitlik azalması
- Enerji sönlümleme azalması
- Kesme kapasitesi azalması
- Lokal hasar büyümesi

Önemli kavram:

“Cumulative Damage” – Birikmiş Hasar

Literatür Özeti

Makalede incelenen çalışmalar:

- Hatzigeorgiou
- Di Sarno
- Abdelnaby & Elnashai
- Jamnani
- Oggu & Gopikrishna
- Massumi

Genel sonuç:

Tekrarlı depremler mühendislik talepleri artırıyor.

Ancak çoğu çalışmanın konusu:

- SDOF
- Çerçeve sistem
- Orta katlı bina
- Ana deprem-artçı deprem

Araştırma Boşluğu

Bu çalışmanın farkı nedir?

Makaledeki araştırma boşluğu:

- Yüksek betonarme perde sistemler
- Çekirdek perde davranışı
- Fiber modelleme
- Beton birim şekildeğiştirme birikimi
- Genelleştirilmiş deprem dizileri
- İkinci deprem ilkinden büyük olabilir

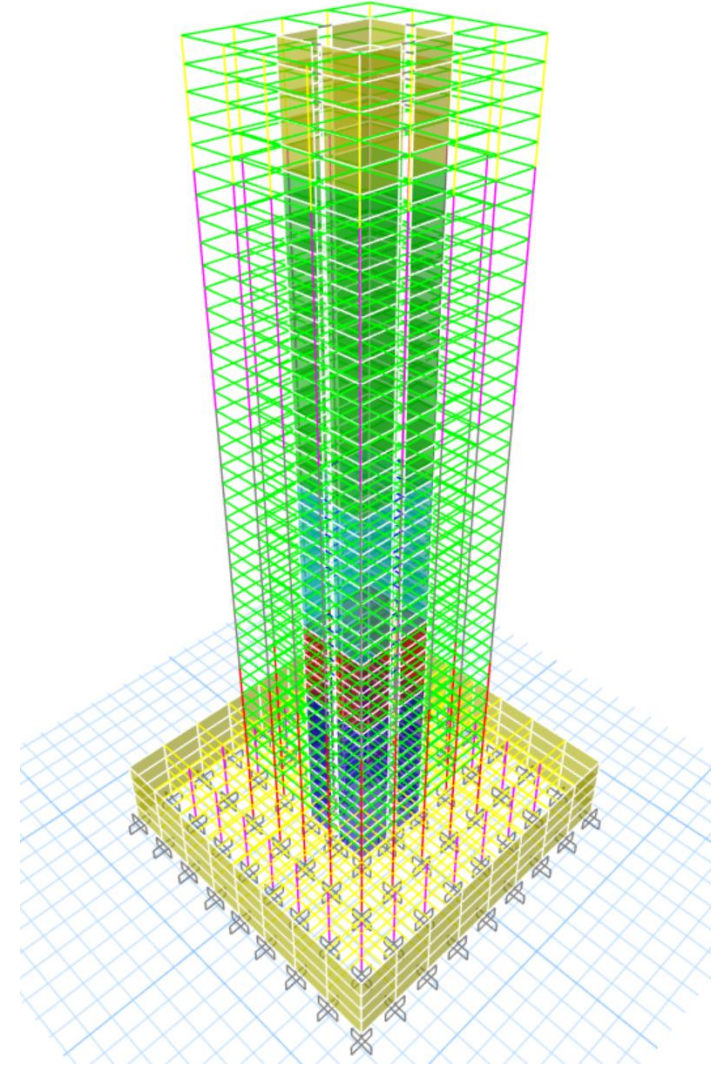
Çalışmanın Katkısı

Bu makalenin temel katkıları

- 40 katlı gerçekçi yüksek bina
- Fiber tabanlı nonlineer model
- Beton histeretik bozulması
- Şekildeğiştirme bazlı performans incelemesi
- Ana ve artçı deprem / mainshock-aftershock dışına çıkan yaklaşım

Ana sonuç:

Performansı görelî ötelenme değil, beton birim şekildeğiştirmesi belirlemiştir.

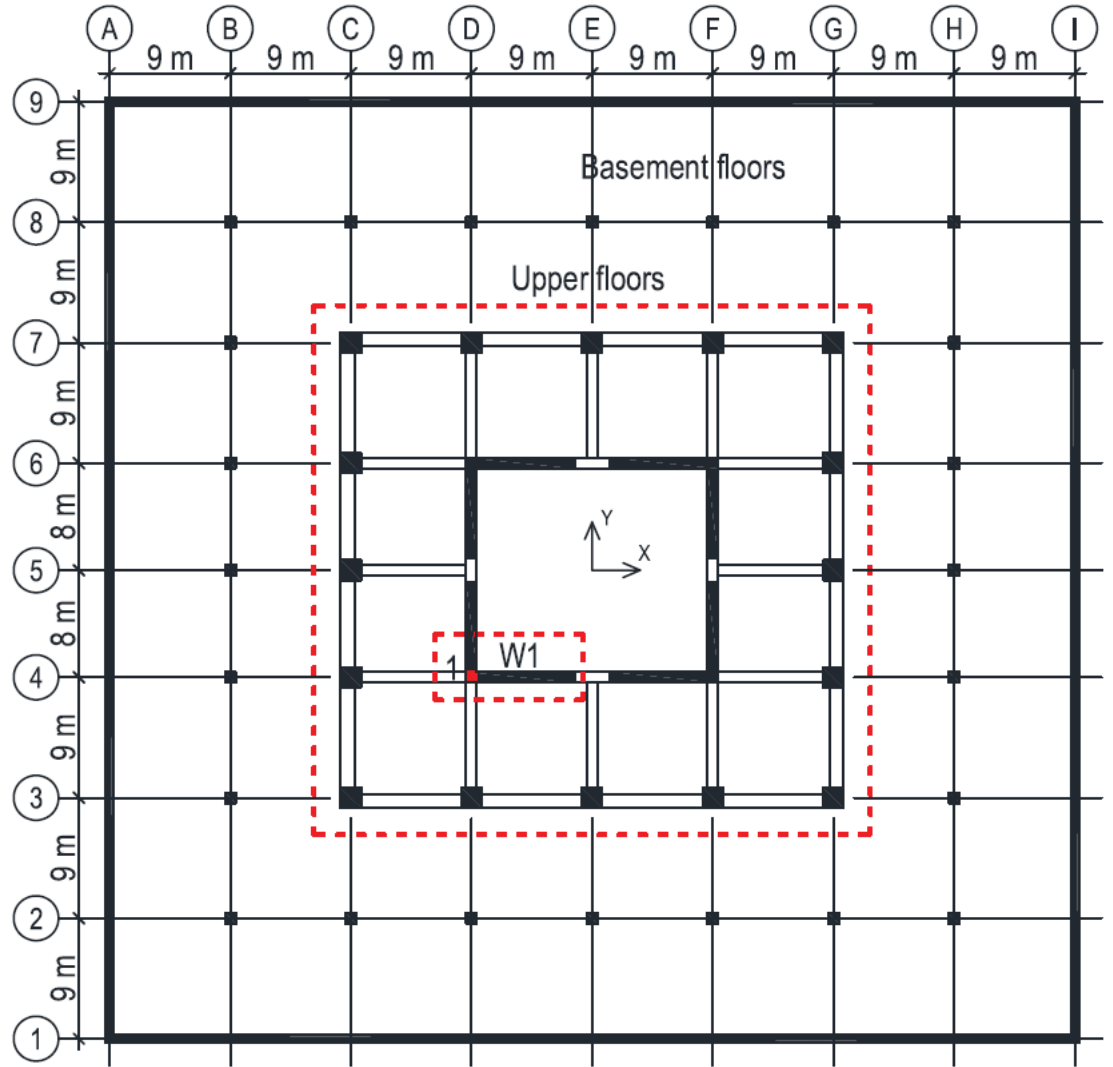


Örnek Bina

Özellikler:

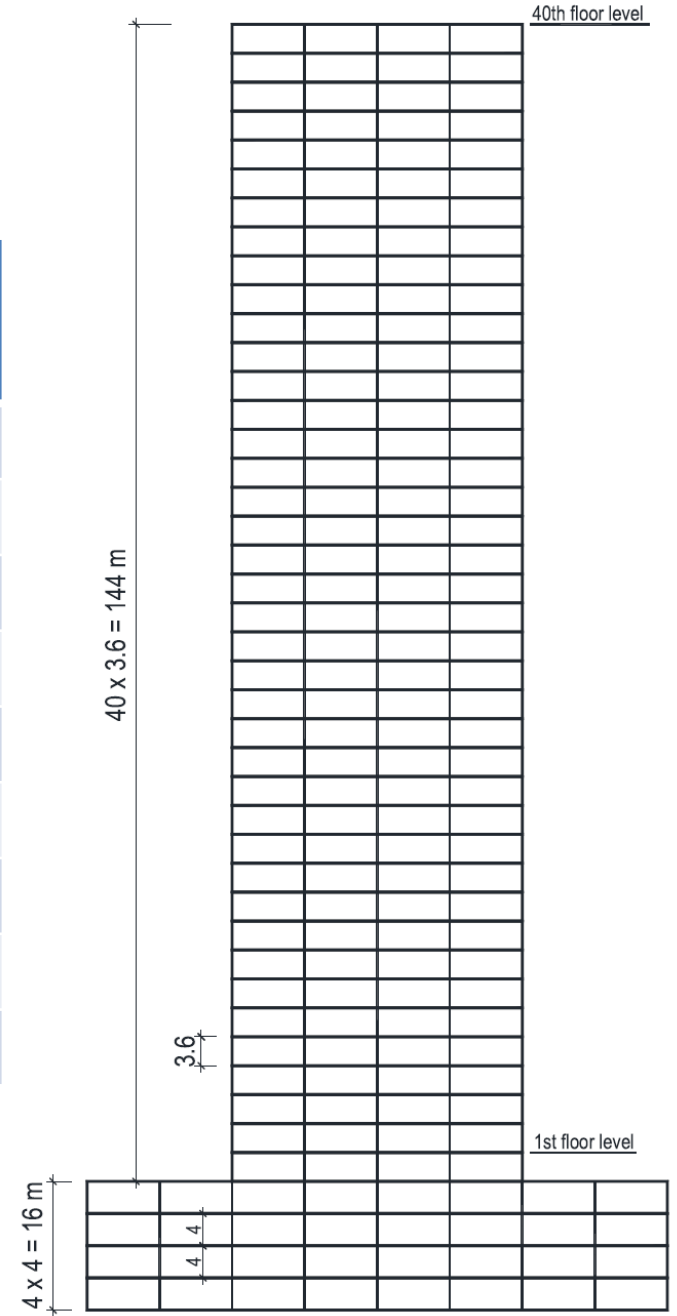
- 40 normal kat
- 4 bodrum
- Kat yüksekliği: 3.6 m
- Simetrik plan
- Çekirdek perde sister

Burulma düzensizliği bilinçli olarak elimine edildi.



Örnek Bina

Yapısal eleman	Perde kalınlığı veya enkesit (m)	Katlar	Boyuna donatı oranı
Perde	0.4	40. kata kadar	0.004
	0.5	35. kata kadar	0.006
	0.6	20. kata kadar	0.008
	0.7	11. kata kadar	0.01
	0.9	6. kata kadar	0.01
Kolon	0.8 x 0.8	40. kata kadar	0.01
	1.0 x 1.0	35. kata kadar	0.01
	1.2 x 1.2	24. kata kadar	0.01
	1.4 x 1.4	8. kata kadar	0.01



Tasarım Parametreleri

Yükler:

Hareketli yük	2 kN/m ²
Kaplama + bölme duvarı	3.5 kN/m ²
Cephe	3.5 kN/m

Malzeme:

Beton: C50

Donatı: B420C

Deprem seviyeleri	Dönüş periyodu (yıl)	S_{DS} (g)	S_{D1} (g)
DD1	2475	2.58	0.84
DD2	475	1.36	0.45
DD3	72	0.47	0.14

TBDY 2018'e Göre İki Aşamalı Tasarım

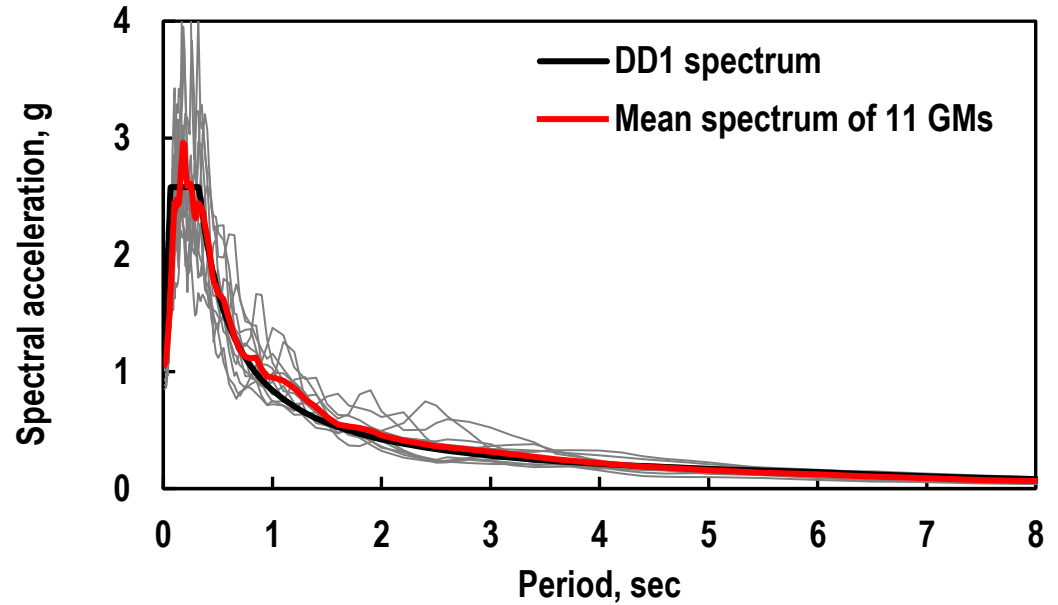
Doğal titreşim periyotları

$$T_{1x} = 3.61 \text{ s}$$

$$T_{1y} = 3.61 \text{ s}$$

$$T_{\text{torsion}} = 2.28 \text{ s}$$

- Uzun periyotlu davranış
- Yüksek bina karakteri
- Perde sistem hakimiyeti



Yer Hareketleri

- PEER NGA-West2
- 11 çift kayıt
- Mw ortalama ≈ 6.74
- $R_{jb} \approx 10.8 \text{ km}$
- $V_{s30} \approx 316 \text{ m/s}$

Record Sequence Number	Scale Factor	Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Mechanism	R_{jb} (km)	V_{s30} (m/s)
68	4.6664	San Fernando	1971	LA - Hollywood Stor FF	6.61	Reverse	22.77	316
139	3.6495	Tabas_ Iran	1978	Dayhook	7.35	Reverse	0	472
162	4.4234	Imperial Valley-06	1979	Calexico Fire Station	6.53	strike slip	10.45	231
164	5.4048	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.53	strike slip	15.19	472
183	2.0788	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #8	6.53	strike slip	3.86	206
719	8.4243	Superstition Hill-02	1987	Brawley Airport	6.54	strike slip	17.03	209
3979	7.5197	San Simeon_ CA	2003	Cambria H.1 C. Bridge	6.52	Reverse	6.97	362
4207	2.8254	Niigata_ Japan	2004	NIG017	6.63	Reverse	4.22	274
4848	4.0598	Chuetsu-Japan	2007	Joetsu Ogataku	6.8	Reverse	16.77	414
5619	4.5797	Iwate_ Japan	2008	IWT011	6.9	Reverse	8.41	279
5827	1.9728	El Mayor-Mexico	2010	Michoacan De Oc.	7.2	strike slip	13.21	242

Doğrusal Olmayan Modelleme Özellikleri

Beton Modeli

- Makaledeki beton modeli:
- Mander modeli
- Compression-only hysteresis
- Energy degradation factor = 0.7

SH/IO sınırı:

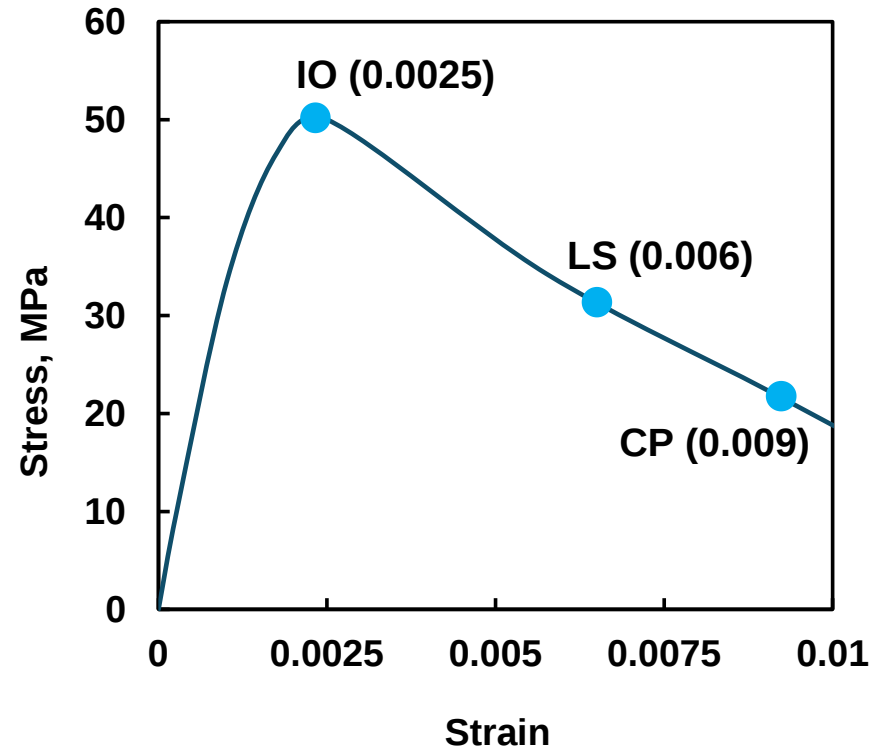
$$\varepsilon_c = 0.0025$$

KH/LS sınırı:

$$\varepsilon_c = 0.006$$

GÖ/CP sınırı:

$$\varepsilon_c = 0.009$$



Doğrusal Olmayan Modelleme Özellikleri

Çelik Modeli

Çelik şekildeğiştirme sınırları:

SH/IO sınırı:

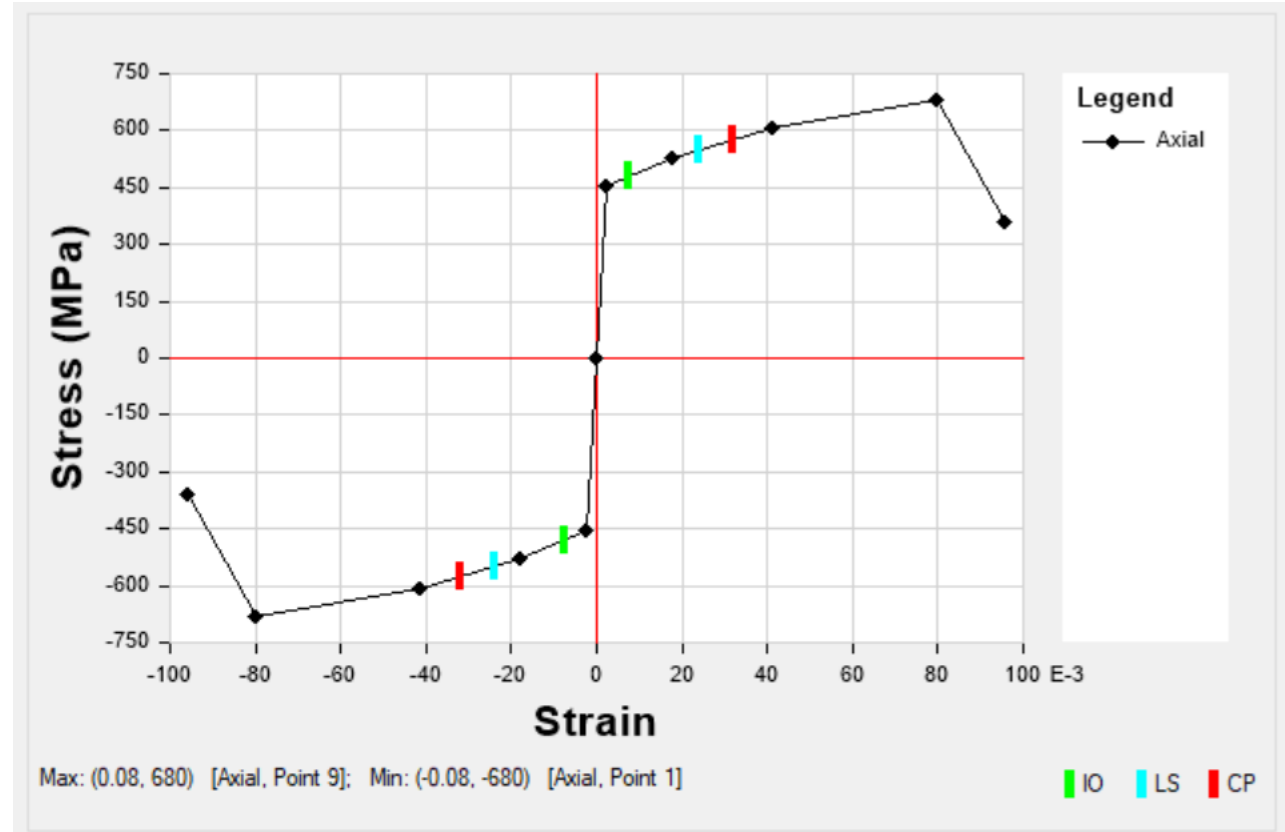
$$\varepsilon_s = 0.0075$$

KH/LS sınırı:

$$\varepsilon_s = 0.024$$

GÖ/CP sınırı:

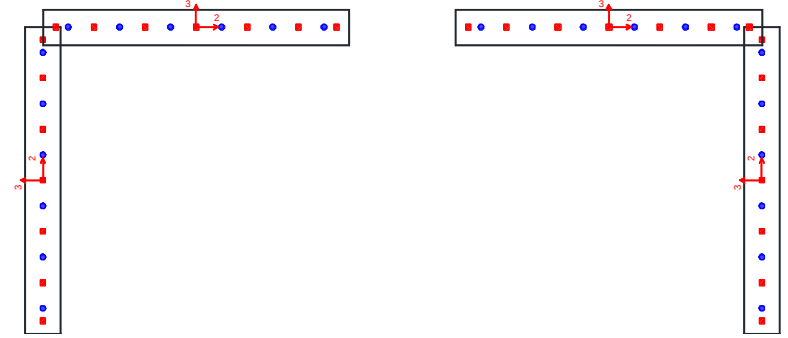
$$\varepsilon_s = 0.032$$



Doğrusal Olmayan Modelleme Özellikleri

Yapısal Eleman Modelleri

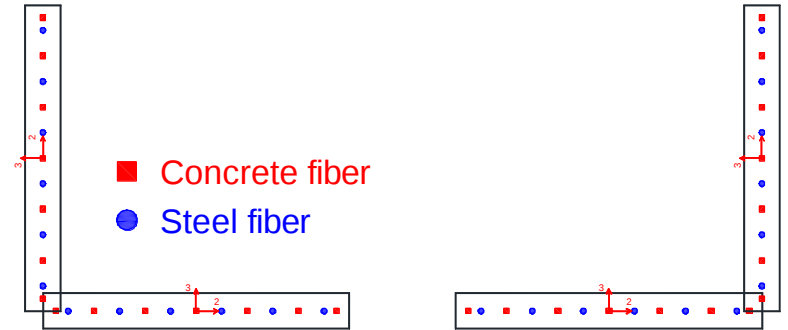
- Çekirdek perde → Fiber eleman
- Kolonlar → Fiber eleman
- Kirişler → Plastik mafsalsal
- Bodrum kat perdeleri → Doğrusal kabuk
- Döşemeler → Doğrusal kabuk



Fiber Eleman Yaklaşımı

Avantajlar:

- Beton/çelik ayrı modellenir
- Lokal birim şekil değiştirme görülebilir
- Plastikleşme dağılımı izlenebilir
- Beton ezilmesi yakalanır



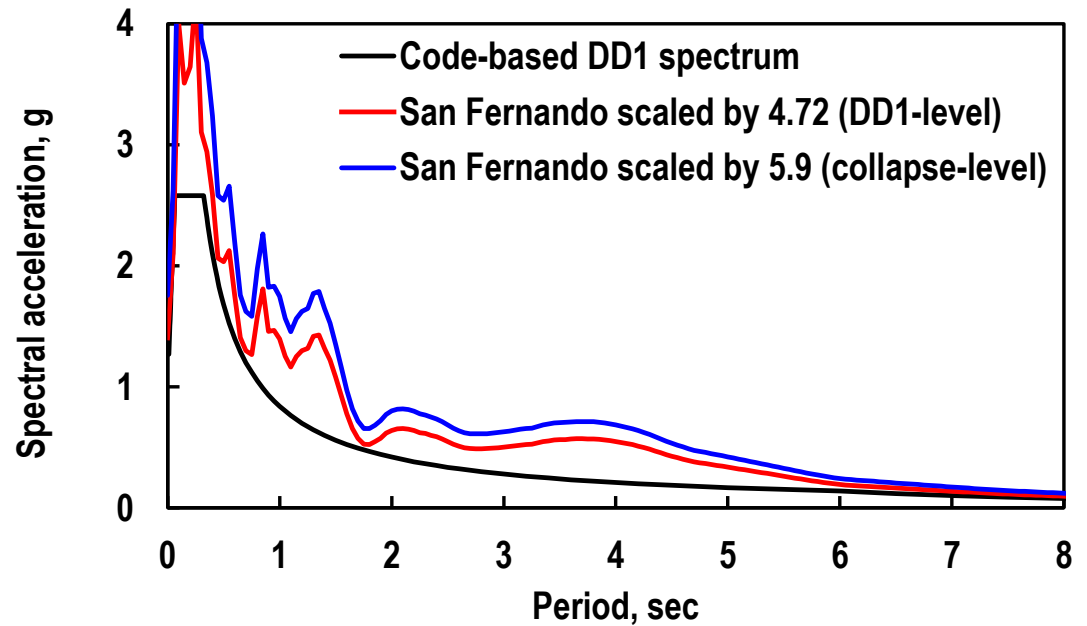
Tekrarlı Deprem Seçimi

Örnek Kayıtlar:

- San Fernando 1971
- Imperial Valley
- Iwate Japan
- El Mayor Mexico

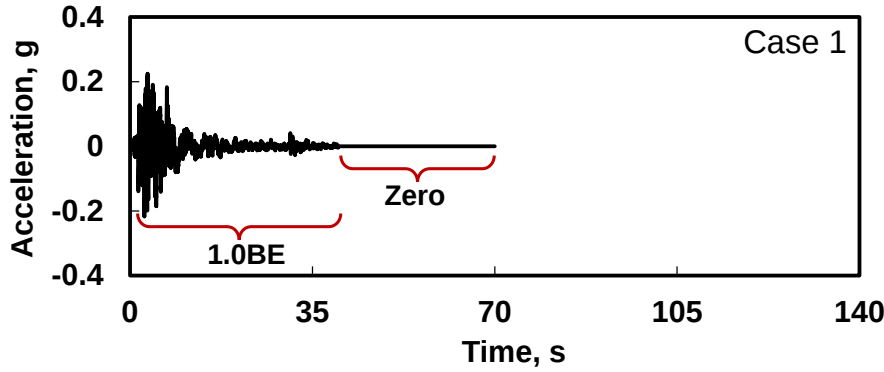
Neden San Fernando seçildi?

- Spektral uyum



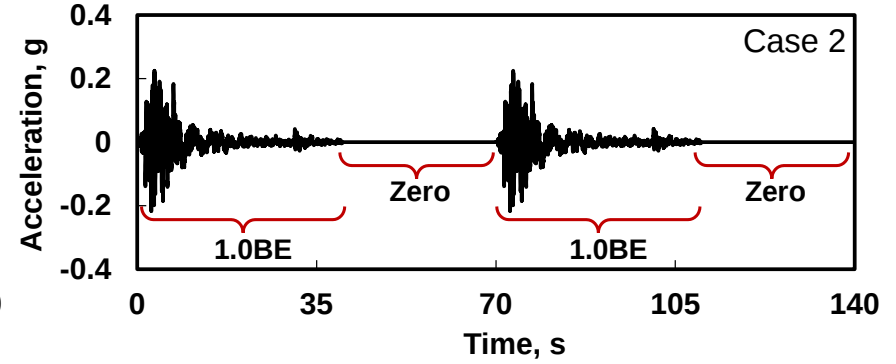
Tekrarlı Deprem Seçimi

Tek deprem



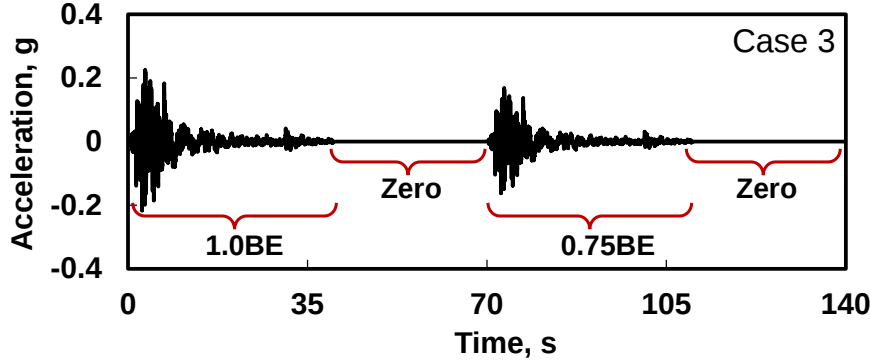
(a)

Aynı deprem + Aynı deprem



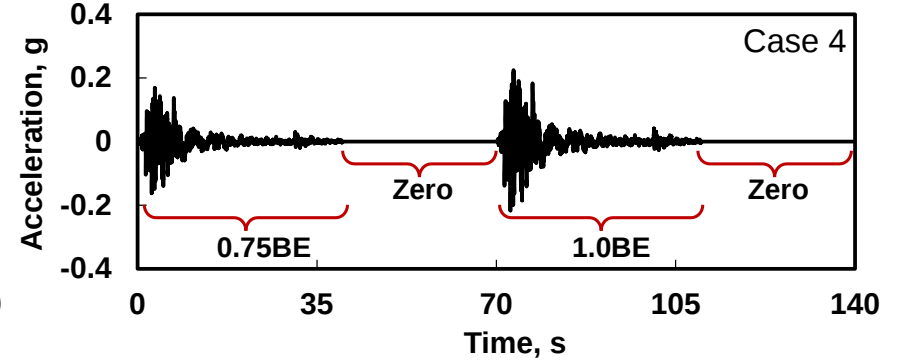
(b)

Büyük + Küçük



(c)

Küçük + Büyük

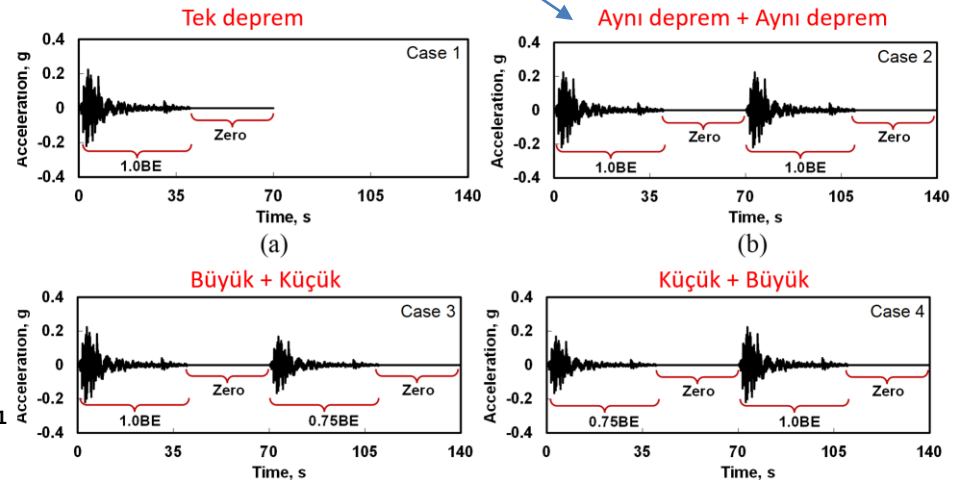
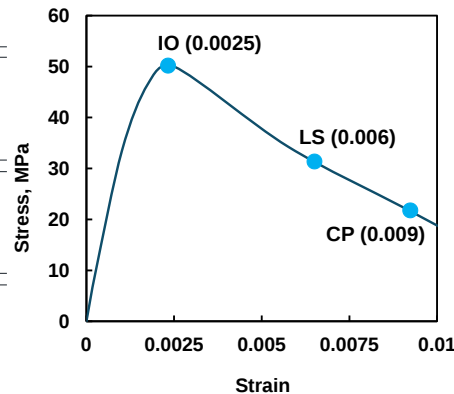
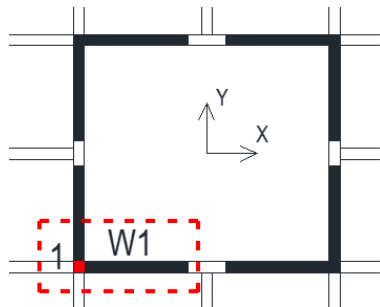
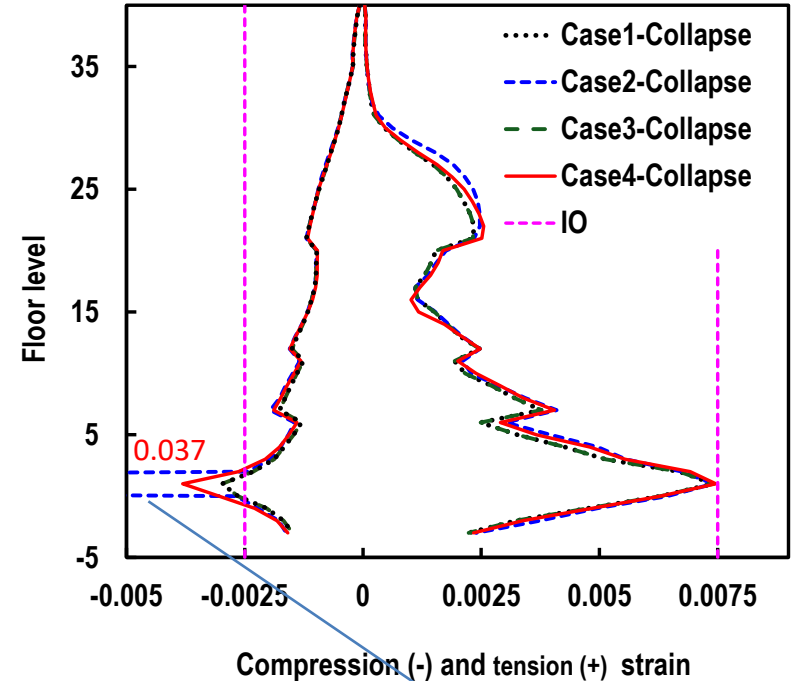
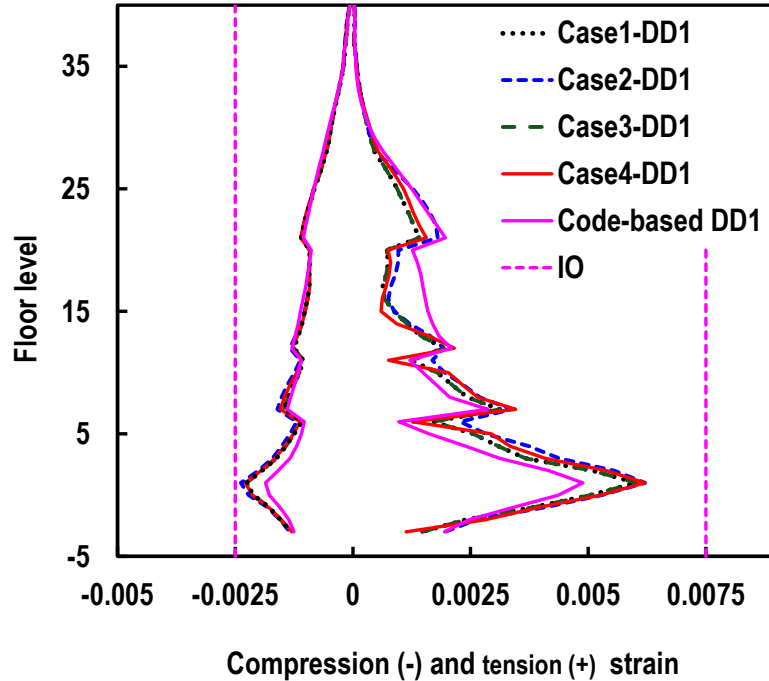


(d)

Ana deprem – Artçı depremler yerine, ana deprem dizilerini temsil eden yer hareketi seçimi yapılmıştır (Pazarcık, Elbistan, Yayladağı depremleri).

Tekrarlı Deprem Altında Malzeme Birim Şekildeğiştirme Sonuçları

Bulgu: İlk deprem SH/IO sınırını aşarsa ikinci aynı deprem göçmeye götürebilir.



Tekrarlı Deprem Altında Malzeme Birim Şekildeğiştirme Sonuçları

Bulgu:

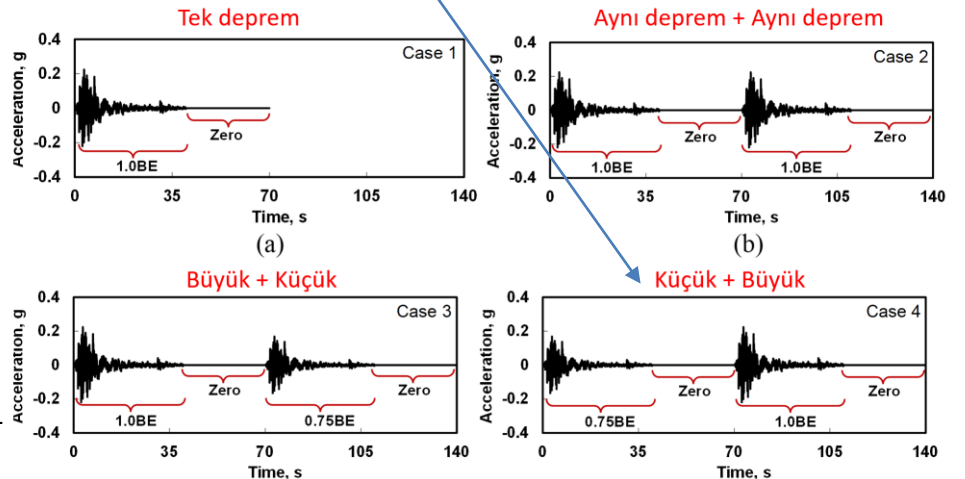
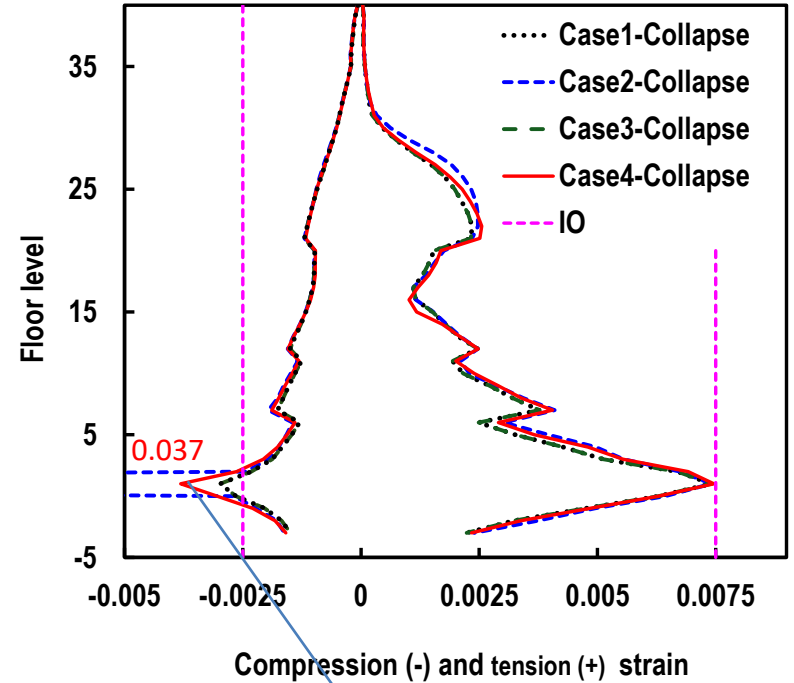
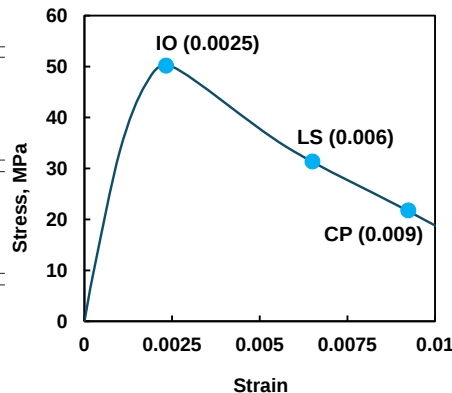
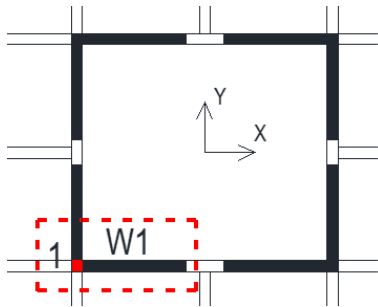
Küçük deprem + büyük deprem

Case 4:

- İlk deprem küçük
- İkinci deprem büyük

Ancak:

- Beton şekildeğiştirmesi büyüyor
- Hasar tetikleniyor
- SH/IO aşılabiliyor, bir sonraki depremde göçme riski ortaya çıkıyor

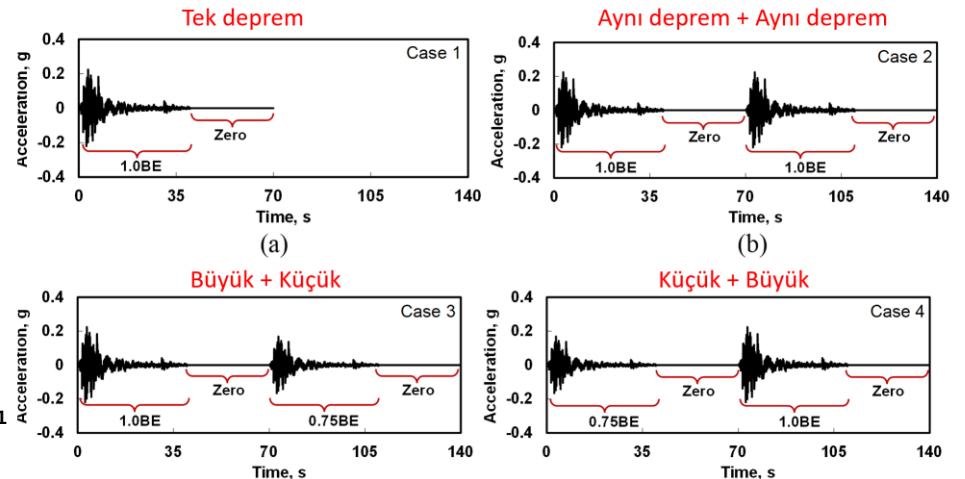
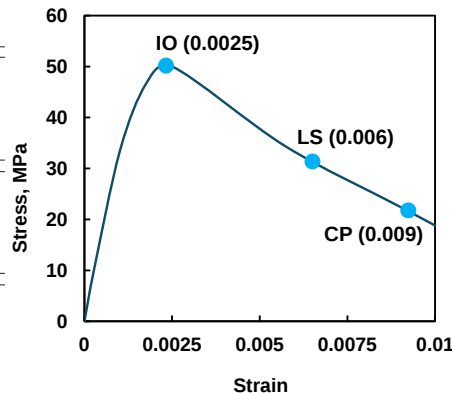
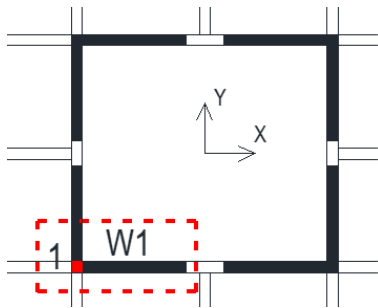
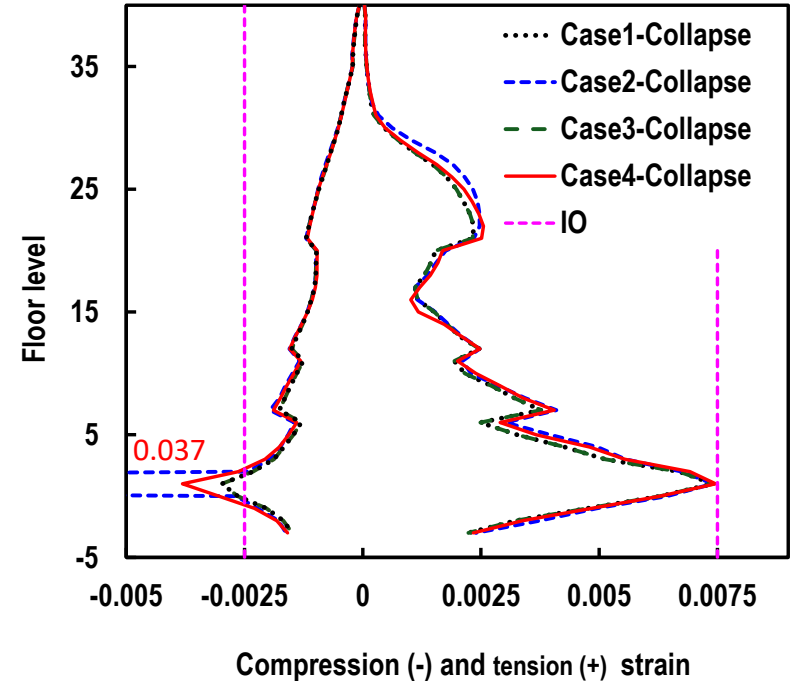


Tekrarlı Deprem Altında Malzeme Birim Şekildeğiştirme Sonuçları

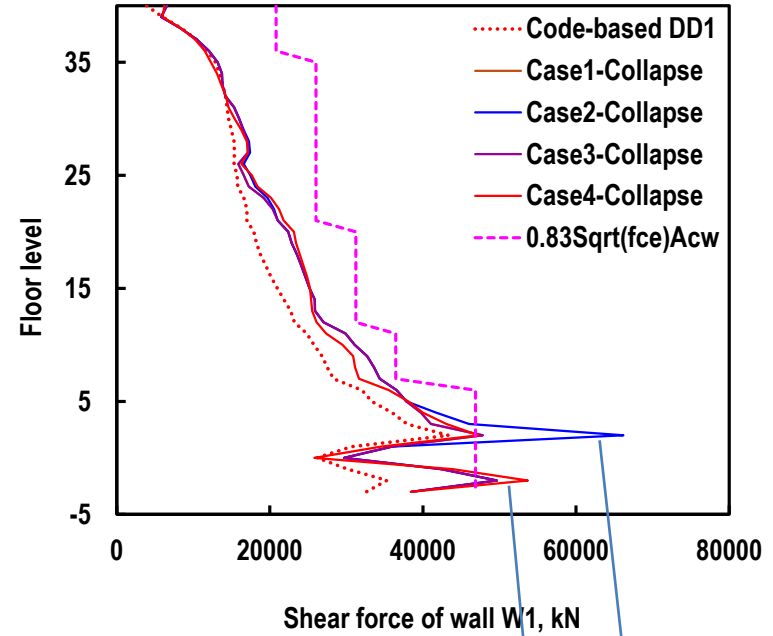
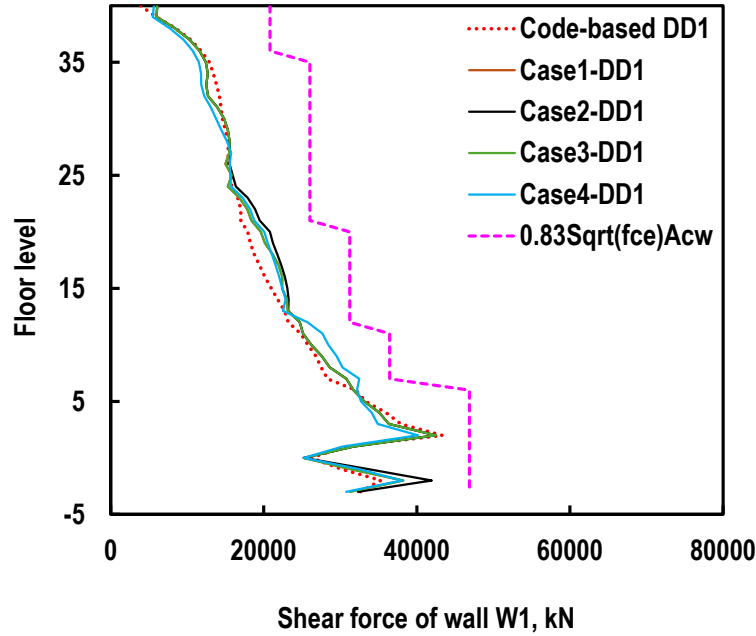
Donatı şekildeğiştirme belirleyici değil.

Neden beton şekildeğiştirme belirleyici?

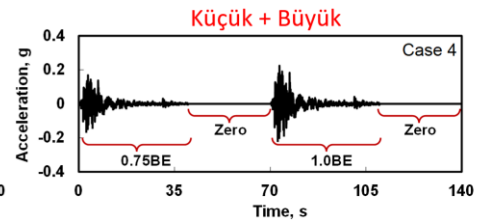
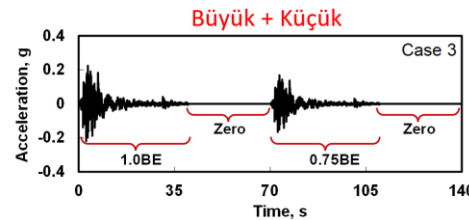
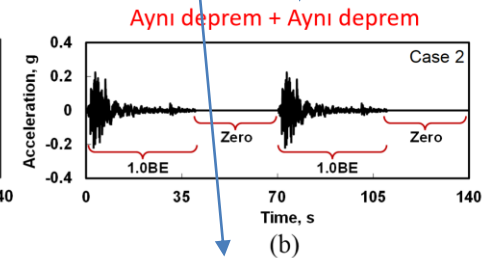
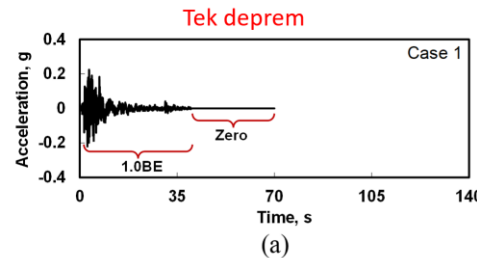
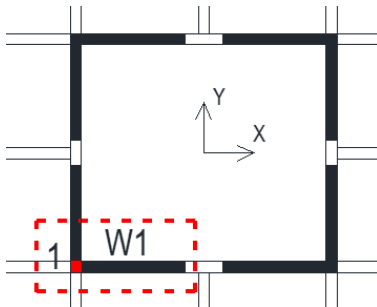
- Perde uçlarında basınç hakim
- Beton şekildeğiştirme kapasitesi düşük
- Çelik şekildeğiştirme kapasitesi yüksek
- Beton çevrimsel etkide çabuk zayıflıyor
- Çelik daha sünek



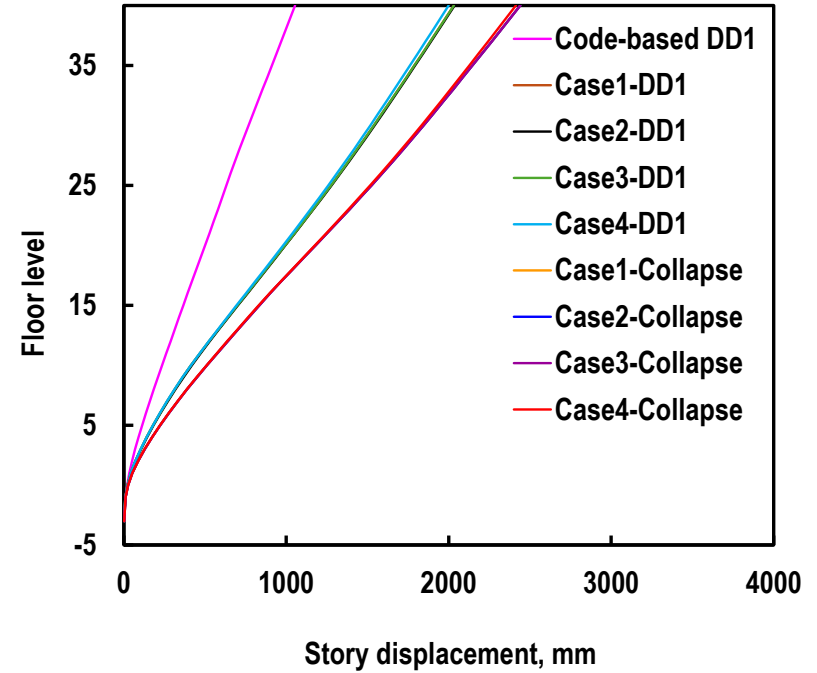
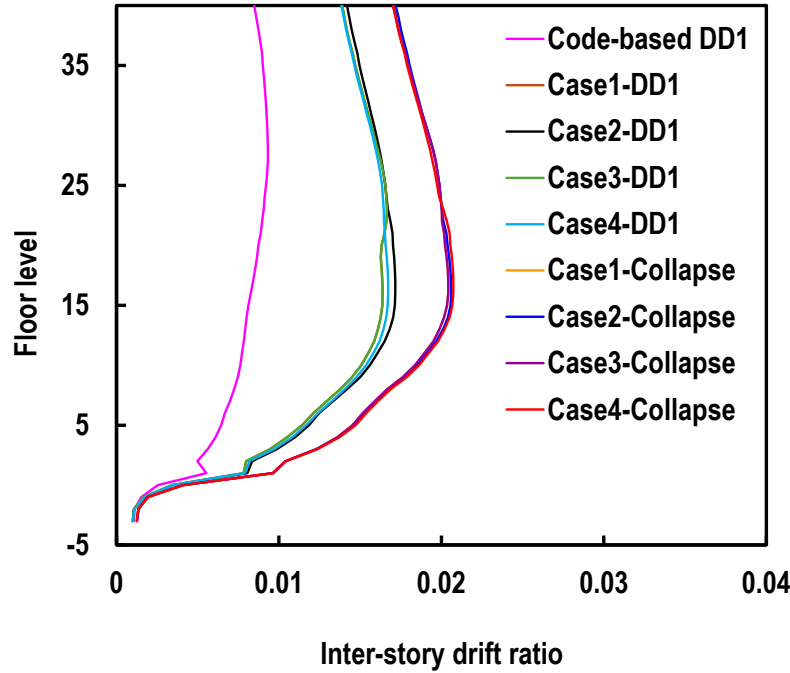
Tekrarlı Deprem Altında Perde Kesme Kuvveti Sonuçları



Tekrarlı deprem kesme göçmesi riski oluşturabilir.



Tekrarlı Deprem Altında Görelî Kat Ötelenme Sonuçları



- Binanın görelî kat ötelenme yanıtı malzeme şekildeğiştirmesi kadar hassas değil.
- Diğer çalıřmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Bunun nedeni hasarın veya göçmenin başlangıç seviyelerinde global rijitliğe etkisi minimum kalıyor olabilir; ilerleyen seviyelerinde durum değişebilir.

Tekrarlı Depremler Sonrası Konular

- Yapı ilk depremden sonra “aynı yapı” değildir
- Rijitlik azalabilir
- Beton çatlakları ilerleyebilir
- Perde uç bölgelerinde ezilme birikebilir
- Kesme kapasitesi azalabilir
- Doğal titreşim periyotları değişebilir

Görelî ötelenme benzer kalsa bile yerel beton şekildeğiş-tirmeleri ciddi şekilde büyüyebilir.

Bu nedenle, sadece görsel inceleme yeterli olmayacaktır.

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ/SHM) Sisteminin Önemi

SHM ile Neler İzlenebilir?

Global Davranış

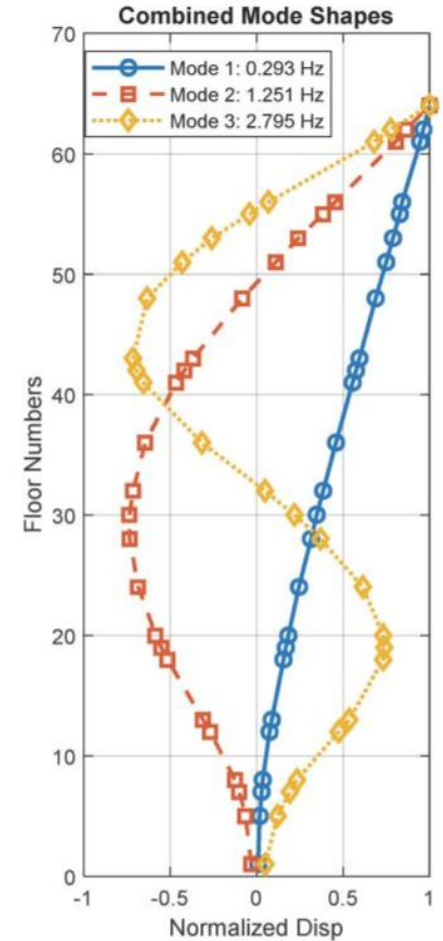
- Periyot değişimi
- Frekans değişimi
- Mod şekilleri
- Sönüm oranı

Lokal Davranış

- Beton şekildeğiştirme birikmesi
- Perde uç bölgesi hasarı
- Kayma deformasyonları
- Kalıcı ötelenme
- Bağ kirişi hasarı



64-Story Rincon Building



www.strongmotioncenter.org

Deprem Dizileri İçin Kritik Amaç

İlk deprem sonrası yapının “kalan kapasitesini” anlamak

Yapısal Sağlık İzleme (YSİ/SHM) Sisteminin Önemi

Frekans Değişimi ve Hasar İlişkisi

Hasar → Rijitlik Azalması → Frekans Azalması

Temel ilişki:

$$f \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$

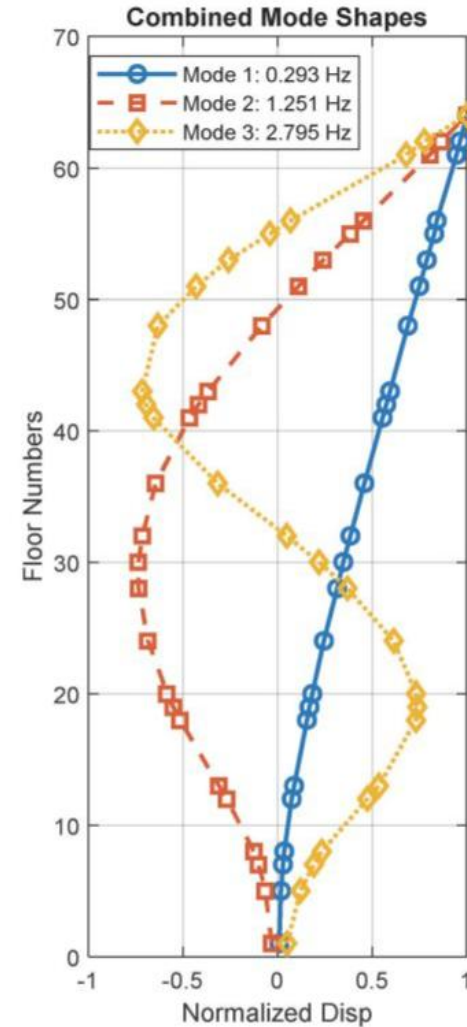
Burada:

- f = doğal frekans
- k = rijitlik
- m = kütle

Deprem sonrası frekans düşüyorsa:

- çatlak artışı
- rijitlik kaybı
- hasar birikimi
- perde ezilmesi

olabilir.



Tekrarlı Depremlerde SHM ile İzlenmesi Gereken Parametreler

Kritik Ölçümler

İvmeölçerler

- Kat ivmeleri
- Modal analiz
- Spektral içerik

Strain Gauge / Fiber Optic Sensors

- Perde boundary region
- Kolon/perde birleşimleri
- Bağ kirişleri

Deplasman Sensörleri

- Kat ötelenmesi
- Kalıcı deplasman

Çevresel Ölçümler

- Sıcaklık
- Rüzgar etkisi
- Nem

Çünkü:

Frekans değişimleri yalnızca deprem kaynaklı olmayabilir

Yüksek Binalarda Rüzgar Tasarımı ve Etkin Rijitlik

Yüksek Binaların Rüzgar Tasarımında Neden Daha Büyük Rijitlik Kullanılır?

Rüzgar analizlerinde:

- Servis performansı önemlidir
- İvme konforu kritiktir
- Göreli ötelenme sınırlıdır
- Yapı çoğunlukla elastik davranır

Bu nedenle, etkin rijitlik katsayıları deprem analizine göre daha yüksek alınır.

Eleman	Deprem	Rüzgar
Perdeler/kolonlar	0.5–0.7 I _g	0.6–1.0 I _g
Kirişler	0.35 I _g	0.5 I _g
Döşemeler	0.25 I _g	0.35–0.5 I _g

Yüksek Binalarda Rüzgar Tasarımı ve Etkin Rijitlik

Tekrarlı Deprem Sonrası Problem

Kritik Soru

Tekrarlı deprem geçirmiş bir yüksek bina:

- Aynı rijitliğe sahip mi?
- Aynı doğal frekansa sahip mi?
- Aynı rüzgar performansını gösterebilir mi?

Makaledeki temel bulguya göre:

- Beton strain birikimi oluşabiliyor
- Rijitlik kaybı gelişebiliyor
- Ancak drift çok değişmeyebiliyor

Bu durum:

Rüzgar ivmelenmelerini doğrudan etkileyebilir.

Yüksek Binalarda İnsan Konforu

Yaklaşık 50 Katlı Binalarda En Kritik Parametre: Rüzgar İvmelenmesi

Tasarımı, dayanımdan çok konfor kontrol eder, İnsan algısı ivmeye duyarlıdır.

Tipik sınırlar:

Kullanım	Tepe İvme
Konut	10–20 milli-g
Ofis	15–25 milli-g
Otel	daha düşük tercih edilir

Deprem sonrası küçük rijitlik kaybı bile ivmeyi ciddi artırabilir.

Deprem Sonrası Yeniden Rüzgar Analizi

Özellikle:

- Çok yüksek binalar
- İnsan konforunun kritik olduğu yapılar
- Oteller
- Konut kuleleri
- Hastaneler
- Ofis kuleleri

için değerlendirilmesi gerekebilir.

Çünkü:

Yapı güvenli olsa bile konfor performansı bozulmuş olabilir.

Özet ve Öneriler

Yüksek Binaların Tasarımını Yakından Etkileyen Konular:

- Tek deprem yaklaşımı sorgulanmalıdır.
- Yüksek binaların deprem performans hedefi yeniden değerlendirilmelidir. Bu çalışmaya göre, yüksek binalarda performans hedefinin SH olması tekrarlı deprem etkilerini minimuma indirebilir.
- Yapısal sağlık izleme sistemi yüksek binalarda aktif olarak kullanılmalıdır.
- Tekrarlı deprem konusunda yapısal sağlık izleme sistemi verileri ve deneysel çalışma sonuçlarına dayalı daha fazla araştırma yapılmalıdır.
- Deprem sonrası durum için yüksek binaların rüzgar tasarımı konusunda daha fazla araştırma yapılmalıdır.

Teşekkür

Sabırla dinlediğiniz için teşekkür ederim.