

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONARME BİNALARIN YAPISAL DAVRANIŞINA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ: 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ
ÜZERİNE BİR İNCELEME

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinem ÖREN

EKİM 2025

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETONARME BİNALARIN YAPISAL DAVRANIŞINA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ: 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ
ÜZERİNE BİR İNCELEME

Sinem ÖREN

ORCID:

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 / 09 / 2025

Tezin Savunma Tarihi : 15 / 10 / 2025

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
ORCID :

Trabzon 2025

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Sinem ÖREN Tarafından Hazırlanan**

**BETONARME BİNALARIN YAPISAL DAVRANIŞINA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ: 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ ÜZERİNE BİR
İNCELEME**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 18 / 09 / 2025 gün ve 2120 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Barış SEVİM

Üye : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yesevi OKUR

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

“Betonarme Binaların Yapısal Davranışına Çarpışma Etkisinin İncelenmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Üzerine Bir İnceleme” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi, deneyim ve değerli katkılarıyla her zaman yanımda olan ve çalışmalarımın her aşamasında yol gösterici desteğini esirgemeyen, akademik bakış açımı geliştirmemde ve araştırma disiplini kazanmamda rehberlik sağlayan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNİŞİK’a teşekkür ederim.

Tez çalışmamı başından itibaren yakından takip eden, titizlikle inceleyen, her aşamasında benimle ilgilenen; yeni başladığım bu akademik yolculukta bilgi ve tecrübelerini cömertçe paylaşan ve desteğini her zaman hissettiren kıymetli hocam Öğr. Gör. Dr. Fezayil SUNCA’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı yürüttüğüm süreç içerisinde kısıtlı zamanından vakit ayıran, yardım ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör Furkan ŞEN’e teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca yol gösterici katkılarıyla yanımda olan İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki hocalarıma ve desteğini her zaman hissettiğim ekip arkadaşlarıma gönülden teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Ümran ÖREN’e, babam Yener ÖREN’e ve kardeşim Gizem ÖREN’e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Sinem ÖREN

Trabzon, 2025

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Betonarme Binaların Yapısal Davranışına Çarpışma Etkisinin İncelenmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Üzerine Bir İnceleme” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/10/2025

Sinem ÖREN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Komşu Binalar Arasındaki Etkileşim.....	2
1.2.1. Kütleleri Farklı Olan Binaların Çarpışması	4
1.2.2. Kat Yükseklikleri Farklı Olan Binaların Çarpışması.....	4
1.2.3. Yükseklikleri Farklı Olan Binaların Çarpışması.....	5
1.2.4. Burulma Kaynaklı Komşu Binaların Çarpışması.....	6
1.2.5. İki den Fazla Binanın Çarpışması	6
1.3. Literatür Araştırması	7
1.3.1. Sayısal ve Analitik Çalışmaları İçeren Literatür Araştırması	9
1.3.2. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Araştırması.....	23
1.4. Tezin Amacı ve İçeriği	34
1.5. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz.....	35
1.6. Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Davranış Modellerinin İdealleştirilmesi	36
1.7. Betonarme Malzeme Modeli	38
1.7.1. Sargılı ve Sargısız Beton Modelleri	38
1.7.2. Donatı Çeliği Modeli	39
1.8. Lineer Olmayan Elastik Yay (Hertz Modeli) Çarpışma Elemanı	40
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	42
2.1. Giriş.....	42
2.2. İncelenen Yapı Hakkında Genel Bilgiler	44
2.3. Yer Hareketinin Seçimi	47

2.4. Binanın Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması	51
2.4.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması	51
2.4.2. Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Tanımlanması	52
2.4.3. Yapıya Etkiyen Yüklerin Tanımlanması	59
2.4.4. Sonlu Elemanlarda Plastik Mafsal Tanımlanması	60
2.4.5. Yer Hareketlerinin Tanımlanması ve Analiz Parametrelerinin Seçilmesi	62
2.4.6. Çarpışma Etkisinin Modellenmesi	64
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	66
3.1. Giriş	66
3.2. İncelenen Yapıya Ait Analiz Sonuçları	66
3.2.1. Modal Analiz Sonuçları	66
3.2.2. Taban Kesme Kuvvetleri	67
3.2.3. Kat İvmeleri ve Çarpışma Kuvvetleri	75
3.2.4. Kat Yer Değiştirmeleri	105
3.2.5. Göreli Kat Ötelemesi	131
3.2.6. Kesme Kuvvetleri ve Burulma Momentleri	135
3.2.7. Taşıyıcı Sistemin Performans Seviyesi	143
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	152
5. KAYNAKLAR	156
ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BETONARME BİNALARIN YAPISAL DAVRANIŞINA ÇARPIŞMA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ: 6 ŞUBAT 2023 KAHRAMANMARAŞ DEPREMLERİ ÜZERİNE BİR
İNCELEME
Sinem ÖREN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2025, 162 Sayfa

Deprem sırasında, bitişik nizam binaların farklı dinamik özellikleri nedeniyle faz farkıyla titreşmesi ve aralarında yeterli mesafenin olmaması sonucu, binalar arasında çarpışma meydana gelir. Geçmiş depremlerde, bu tür çarpışmalar birçok binada önemli yapısal hasarlar meydana getirmiş hatta bu hasarlar toptan göçmelere dahi neden olmuştur. Dolayısıyla komşu binaların tasarım ve analizlerinde bu çarpışma etkilerinin yapısal davranışa etkisinin dikkate alınması büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma etkileri nedeniyle ağır hasar görmüş bir betonarme binanın sismik davranışı ve hasar mekanizmaları zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ele alınan bina ile çevre duvarı arasında 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında çarpışma meydana gelmiş olup, çarpışan kolonda önemli hasarlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çalışmada hem kolonda hem de döşeme seviyesinde çarpışmayı temsil eden dört farklı etkileşim senaryosu tanımlanmıştır. İncelenen binanın sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde kaydedilmiş gerçek ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizler çarpışma etkilerinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, görelî ötelemler, kat ivmeleri, etkileşimin meydana geldiği kolonlardaki kesme kuvvetleri vb. karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan değerlendirmeler çarpışma etkilerinin yapısal tepkileri önemli ölçüde etkilediğini ve farklı çarpışma konfigürasyonlarının yapısal tepki üzerinde farklı etkiler yarattığını ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Çarpışma, Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, Kahramanmaraş depremleri, Hasar

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF POUNDING EFFECTS ON THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS: A CASE STUDY ON THE FEBRUARY 6, 2023 KAHRAMANMARAŞ EARTHQUAKES

Sinem ÖREN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK
2025, 162 Pages

During an earthquake, adjacent buildings with different dynamic characteristics may vibrate out of phase, and if there is insufficient separation distance, collisions can occur. Past earthquakes have shown that such collisions can cause significant structural damage and, in some cases, total collapse. Therefore, considering pounding effects on structural behavior is crucial in the design and analysis of adjacent buildings. This study investigates the seismic behavior and damage mechanisms of a reinforced concrete building that sustained severe damage during the 2023 Kahramanmaraş earthquakes using nonlinear time-history analysis. During the earthquakes, contact occurred between the building and an adjacent boundary wall, causing significant damage to the impacted column. Four interaction scenarios representing pounding at both the column and slab levels were defined. The building's finite element model was created in SAP2000, and real ground motion records from nearby stations were used. Analyses were conducted in two stages: with and without pounding effects. Relative displacements, floor accelerations, shear forces at the impact region, and other response parameters were compared. The results showed that pounding significantly affects structural responses and that different configurations produce distinct impacts.

Key Words: RC Building, Pounding, Time history analysis, Kahramanmaraş earthquakes, Damage

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde meydana gelen çarpışma kaynaklı hasarlar (Damcı vd. ,2025)	3
Şekil 2. (a) 1998 Adana depremi, (b) 1999 Gölcük depremi, (c) 1999 Athens depremi, (d) 2009 L'aquila depremi, (e) 2011 Van Depremi (Tezcan,2013; Korkmaz,2015; URL-1,2025; Chenna & Ramancharla, 2018).....	5
Şekil 3. 1985 Mexico City depreminde meydana gelen çarpışma hasarları (URL-2, 2025, URL-3, 2025).....	6
Şekil 4. 1971 San Fernando depreminde meydana gelen çarpışma sonucu merdiven kulesinin kalıcı deformasyonu (Bertero vd., 1973; Jankowski, 2009).....	8
Şekil 5. (a) Konfigürasyon A; (b) konfigürasyon B; (c) konfigürasyon C (Pant ve Wijeyewickrema, 2012).....	14
Şekil 6. Akköse ve Sunca (2016) tarafından dikkate alınan planda düzenli ve düzensiz olan yapılar	15
Şekil 7. Karayannis ve Naoum, (2018) tarafından dikkate alınan çarpışma senaryoları	17
Şekil 8. Kamel (2023) tarafından bağ kirişleri ile çarpışma etkilerinin azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen çalışma	21
Şekil 9. Aggarwal ve Saha (2025) tarafından dikkate alınan yapı konfigürasyonları.....	23
Şekil 10. Chau vd. (2004) tarafından gerçekleştirilen deneye ait görsel	25
Şekil 11. Hong Kong'da bulunan gerçek iki yapının sarsma masası deneyleri için ölçeklendirilmiş modelleri ve deney düzeneği (Chau vd.,2006)	26
Şekil 12. Jankowski'nin (2010) gerçekleştirdiği serbest düşme ve sarsma masası deneylerine ait düzenekleri	28
Şekil 13. Khatiwada ve Chouw (2013) tarafından oluşturulan deney düzeneği	29
Şekil 14. El-Khoriby vd. (2015) tarafından oluşturulan deney düzeneği	30
Şekil 15. Crozet vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen deneylere ait görsel	31
Şekil 16. Miari vd. (2022)'nin çarpışma deneyleri için geliştirdiği deney düzeneği	32
Şekil 17. Sunca (2023) tarafından gerçekleştirilen sarsma masası deneylerine ait görseller	33
Şekil 18. Hubballi ve Jangid (2024) tarafından esnek ve rijit modeller için oluşturulan deney düzeneği	34

Şekil 19. Betonarme bir taşıyıcı elemanın kesitinde doğrusal olmayan davranışın sürekli olarak dağıldığı tipik bir kesit lif modeli (Yön & Calayır, 2013)	37
Şekil 20. TBDY-2018’de önerilen beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	39
Şekil 21. TBDY-2018’de önerilen donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	40
Şekil 22. Binalar arasındaki çarpışma	40
Şekil 23. Hertz yay modelinde çarpışma kuvveti–yer değiştirme ilişkisi (Muthukumar ve DesRoches, 2006).....	41
Şekil 24. Seçilen binanın 2023 Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrasına ait görseller	42
Şekil 25. Seçilen binaya ait bodrum, zemin, normal kat kalıp planları	45
Şekil 26. Seçilen binaya ait kesit detayları	46
Şekil 27. Seçilen binaya yakın konumda bulunan ve deprem sırasında veri kaybı yaşanan istasyonlar	47
Şekil 28. Seçilen istasyonların depremin merkez üssüne ve binaya göre konumları	48
Şekil 29. Kahramanmaraş-Pazarcık Depremi’ne ait 6304 numaralı istasyondan elde edilen ivme kayıtları.....	49
Şekil 30. Kahramanmaraş-Elbistan Depremi’ne ait 4613 numaralı istasyondan elde edilen ivme kayıtları.....	50
Şekil 31. Kahramanmaraş depremleri için elde edilen tepki spektrumları (a. Pazarcık depremi, b. Elbistan depremi)	51
Şekil 32. Beton (a) ve çeliğe (b) ait gerilme ve şekil değiştirme diyagramları	52
Şekil 33. Çarpışmasız durum için oluşturulan referans modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri	54
Şekil 34. Durum-1 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri	55
Şekil 35. Durum-2 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri	56
Şekil 36. Durum-3 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri	57
Şekil 37. Durum-4 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri	58
Şekil 38. SAP2000 programında kolonlar için plastik mafsalları tanımlanması	61
Şekil 39. SAP2000 programında kirişler için plastik mafsalları tanımlanması	61
Şekil 40. Doğrusal olmayan statik analiz için seçilen analiz parametreleri	63
Şekil 41. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için seçilen analiz parametreleri	64
Şekil 42. SAP2000’de tanımlanan Hertz tipi çarpışma elemanına ait parametreler	65
Şekil 43. Mod sayısına göre toplam kütle katılım oranları	67
Şekil 44. İlk üç moda ait mod şekilleri ve doğal titreşim periyotları	67
Şekil 45. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın x yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi	68

Şekil 46. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın y yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi	69
Şekil 47. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın x yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 48. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın y yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 49. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın x yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi	71
Şekil 50. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın y yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi	72
Şekil 51. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın x yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 52. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın y yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.....	73
Şekil 53. Çarpışma senaryolarında, çarpışmasız duruma kıyasla en büyük taban kesme kuvvetlerindeki yüzdesel değişimler (a. Pazarcık depremi, b. Elbistan depremi)	74
Şekil 54. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	77
Şekil 55. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	78
Şekil 56. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	79
Şekil 57. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	80
Şekil 58. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	81
Şekil 59. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	82
Şekil 60. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	83
Şekil 61. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	84
Şekil 62. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	85
Şekil 63. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	86
Şekil 64. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi	87
Şekil 65. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında y doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi	87

Şekil 66. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	88
Şekil 67. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	89
Şekil 68. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	90
Şekil 69. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	91
Şekil 70. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	92
Şekil 71. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	93
Şekil 72. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	94
Şekil 73. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	95
Şekil 74. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	96
Şekil 75. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri.....	97
Şekil 76. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi	98
Şekil 77. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında y doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi	98
Şekil 78. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki ivme-zaman grafiklerinin seçilen senaryolar için karşılaştırılması (Pazarcık depremi)	100
Şekil 79. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depreminde elde edilen çarpışma kuvveti-zaman grafikleri	101
Şekil 80. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki ivme-zaman grafiklerinin seçilen senaryolar için karşılaştırılması (Elbistan depremi)	102
Şekil 81. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depreminde elde edilen çarpışma kuvveti-zaman grafikleri	103
Şekil 82. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Pazarcık depremi)	104
Şekil 83. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Elbistan depremi)	104

Şekil 84. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	107
Şekil 85. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	108
Şekil 86. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	109
Şekil 87. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	110
Şekil 88. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	111
Şekil 89. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	112
Şekil 90. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	113
Şekil 91. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	114
Şekil 92. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	115
Şekil 93. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	116
Şekil 94. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	117
Şekil 95. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	118
Şekil 96. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	119
Şekil 97. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	120
Şekil 98. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	121
Şekil 99. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	122
Şekil 100. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	123
Şekil 101. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	124
Şekil 102. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	125
Şekil 103. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri.....	126

Şekil 104. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinin değişimi	127
Şekil 105. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinin değişimi	128
Şekil 106. Çarpışmasız duruma kıyasla en büyük yer değiştirme değerlerinde meydana gelen değişimler	130
Şekil 107. Etkileşimin meydana geldiği yöndeki görelî kat ötelemeleri	132
Şekil 108. Pozitif yönde görelî kat ötelemelerinde meydana gelen değişimler	134
Şekil 109. Negatif yönde görelî kat ötelemelerinde meydana gelen değişimler	135
Şekil 110. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca kesme kuvvetinde meydana gelen değişimler (Pazarcık depremi)	137
Şekil 111. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca kesme kuvvetinde meydana gelen değişimler (Elbistan depremi)	138
Şekil 112. Dikkate alınan kolondaki en büyük kesme kuvveti değerlerindeki değişimler	140
Şekil 113. Kat seviyelerine göre burulma momentlerinin değişimi	141
Şekil 114. Çarpışmanın burulma momentleri üzerindeki etkisi	142
Şekil 115. Doğrusal olmayan analizler sonucunda kirişlerdeki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı	146
Şekil 116. Doğrusal olmayan analizler sonucunda kolonlardaki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı	147
Şekil 117. Doğrusal olmayan analizler sonucunda perdelerdeki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı	147
Şekil 118. Çarpışmasız durum için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen plastik mafsalları dağılımı	148

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Seçilen bina hakkında genel bilgiler	46
Tablo 2. Yapıya etkiyen yükler	60
Tablo 3. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız duruma kıyasla kat ivmelerinde meydana gelen değişimler.....	76
Tablo 4. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız duruma kıyasla kat ivmelerinde meydana gelen değişimler.....	76
Tablo 5. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri	129
Tablo 6. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri	129
Tablo 7. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depreminde elde edilen görelî kat ötelemesi oranları	133
Tablo 8. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depreminde elde edilen görelî kat ötelemesi oranları	133
Tablo 9. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca elde edilen en büyük kesme kuvveti değerleri (kN)	139

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_c	: Gövde kesiti beton alanı
A_{sw}	: Kesme donatısının toplam en kesit alanı
b_w	: Kesit genişliği
d	: Yapılar arasındaki boşluk miktarı, faydalı yükseklik
$G\ddot{O}$	: Göçmenin önlenmesi
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_s	: Çeliğin elastisite modülü
$f_G(t)$	: Çarpışma kuvveti
f_c	: Sargılı betonda beton basınç gerilmesi
f_{cc}	: Sargılı beton dayanımı
f_{co}	: Sargısız betonun basınç dayanımı
f_{ctd}	: Beton tasarım eksenel çekme dayanımı
f_{ck}	: Betonun karakteristik dayanımı
f_s	: Donatı çeliğindeki gerilme
f_{sy}	: Donatı çeliğinin akma dayanımı
f_{su}	: Donatı çeliğinin kopma dayanımı
f_{yk}	: Donatı çeliğinin karakteristik dayanımı
f_{ywd}	: Enine donatıların tasarım akma dayanımı
k_g	: Doğrusal olmayan elastik yay rijitliği
KH	: Kontrollü hasar
N_d	: Tasarım eksenel kuvveti
SH	: Sınırlı hasar
$u(t)$	: Zamana bağlı yer değiştirme
$u(t)_i$	: i ucunun zamana bağlı yer değiştirmesi
$u(t)_j$	: j ucunun zamana bağlı yer değiştirmesi
s	: Etriye aralığı
ε_{cu}	: Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekil değiştirmesi
ε_s	: Donatı çeliğinin pekleşme başlangıcındaki birim şekil değiştirmesi
ε_c	: Beton basınç birim şekil değiştirmesi

ϵ_{su}	: Donatı çeliğinin kopma birim şekil değıştirmesi
ϵ_{sy}	: Donatı çeliğinin akma birim şekil değıştirmesi
Δt	: Zaman adım aralığı
AFAD	: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
AFAD-TADAS	: AFAD Türkiye İvme Veri tabanı ve Analiz Sistemi
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EC 8	: Eurocode 8
TBDY	: 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğı
TS 498	: Türk Standardı 498



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Depremler, yer kabuğunda biriken gerilmelerin ani olarak boşalması sonucu ortaya çıkan doğal afetler arasında, can ve mal kaybına en fazla yol açan olaylardandır. Hem ülkemiz hem de dünya ölçeğinde geçmişte meydana gelen büyük depremler, özellikle yerleşim alanlarında bulunan yapıların bu afetlere karşı ne denli savunmasız olduğunu defalarca gözler önüne sermiştir. Türkiye gibi aktif tektonik kuşaklar üzerinde yer alan ülkelerde, yapı stokunun deprem etkilerine karşı güvenliğinin sağlanması, yalnızca mühendislik disiplini açısından değil, toplumsal güvenlik ve sürdürülebilir şehircilik açısından da kritik bir öneme sahiptir.

Deprem mühendisliği kapsamında yapıların sismik performansını doğru bir şekilde değerlendirmek, güvenli tasarım ve güçlendirme stratejileri geliştirebilmek için yapıların gerçek davranışlarını yansıtan modelleme ve analiz yöntemlerinin kullanılması gereklidir. Özellikle doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gibi gelişmiş yöntemler, yapıların deprem sırasında nasıl tepki verdiğini, hangi bölgelerde plastikleşmelerin başladığını ve potansiyel göçme mekanizmalarının neler olabileceğini detaylı biçimde ortaya koyabilmektedir. Bu tür analizler, yalnızca yeni yapı tasarımlarında değil, aynı zamanda mevcut durum değerlendirmelerinde ve deprem sonrası hasar görmüş yapıların incelenmesi amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Yapı performansının değerlendirilmesi, yalnızca yapıların taşıyıcı sistem bileşenlerini incelemekle sınırlı olmayıp, aynı zamanda zemin-yapı etkileşimi, yapı düzensizlikleri ve yapılar arası etkileşim gibi karmaşık dinamik etkilerin de göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Özellikle bitişik binalar arasında meydana gelen çarpışma etkisi, deprem sırasındaki hasarları artıran önemli bir etkileşim türü olup, bu durum birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve deneysel, analitik ve sayısal modelleme çalışmalarıyla detaylı şekilde ele alınmıştır.

6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen, merkez üssü Pazarcık ve Elbistan olan ve moment büyüklükleri sırasıyla $M_w = 7.7$ ve $M_w = 7.6$ olarak ölçülen depremler, Türkiye'nin güneydoğusunda yer alan 11 ilde büyük yıkıma neden olmuş ve ülke tarihinde en fazla can kaybının yaşandığı depremler arasına girmiştir. Bu depremler; yüzeye yakın

odak derinlikleri, uzun süreli yer hareketleri ve zayıf zemin koşulları nedeniyle çok geniş bir alanda ciddi yapısal hasarlara yol açmıştır. Ayrıca, birçok noktada kaydedilen maksimum ivme değerlerinin Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'de belirtilen tasarım spektrumlarını aşması, hasar düzeyini önemli ölçüde artırmıştır (Işık vd., 2023).

Yapılan hasar tespit çalışmaları ve gözlemler sonucunda, yapıların göçmesine ya da ciddi yapısal hasar almasına yol açan başlıca nedenler arasında; düşük dayanımlı beton kullanımı, aderansı zayıf düz donatılar, yumuşak kat oluşumu, kısa kolon davranışı, taşıyıcı sistem süreksizlikleri, kiriş-kolon birleşim detaylarının yetersizliği, uygun yerleştirilmemiş perde duvarlar, burulma düzensizlikleri ve komşu binalar arasında oluşan çarpışma etkileri yer almaktadır (Avcil, 2024; Vuran, 2025). Elde edilen bulgular, mevcut yapı stokunun deprem güvenliği açısından ciddi zafiyetler içerdiğini ve yapıların sismik performansının detaylı mühendislik analizleriyle değerlendirilmesinin kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

1.2. Komşu Binalar Arasındaki Etkileşim

Nüfus artışının tetiklediği konut talebindeki hızlı artış, özellikle büyük şehirlerin kentsel alanlarında bitişik nizam yapılaşmanın yaygın şekilde benimsenmesine yol açmıştır. Bu eğilim; sınırlı arazi varlığı, yetersiz kent planlama uygulamaları ve estetik-mimari kaygılarla birleşerek binaların birbirine oldukça yakın mesafelerde inşa edilmesiyle sonuçlanmıştır (Çetinkaya, 2011; Gökdemir, 2019; Sunca, 2023). Ancak, geçmiş depremler sırasında gözlemlenen en kritik hasar mekanizmalarından biri, bu tür yapılaşma biçiminin sonucu olan bitişik binalar arasındaki çarpışma (çekiçleme) etkisi olmuştur.

Çarpışma etkisi, deprem sırasında bitişik yapıların farklı dinamik karakteristiklere sahip olması nedeniyle meydana gelen faz farkı sonucunda, yapıların birbirine yaklaşarak fiziksel temas kurması şeklinde tanımlanabilir. Bu durum, ani ivme değişimleriyle birlikte, yapısal elemanlarda beklenmeyen hasarlara yol açabilmektedir.

Deprem anında meydana gelen bu etkileşim, özellikle yapılar arasında yeterli sismik derz mesafesinin bulunmadığı ve dinamik özellikleri birbirinden farklı olan komşu binalarda daha şiddetli hale gelmektedir. Bu çarpışma etkisinin şiddeti; yapıların doğal periyotları, toplam kütleleri, kat yükseklikleri, sönüm oranları, mod şekilleri ile planda ve düşey doğrultuda mevcut olan yapısal düzensizlikler gibi parametreler tarafından etkilenmektedir.

Komşu yapılar arasında meydana gelen çarpışmalar, farklı mekanizmalarla gerçekleşebilmekte olup, bu etkiler yalnızca en üst katlarla sınırlı kalmamakta; yapıların ara

kat seviyelerinde de oluşabilmektedir. Bina türü yapılarda çarpışma etkileri genel olarak beş ana grupta sınıflandırılmaktadır: (i) kütleleri farklı olan binaların çarpışması, (ii) kat yükseklikleri farklı olan binaların çarpışması, (iii) yükseklikleri farklı olan binaların çarpışması, (iv) burulma kaynaklı komşu binaların çarpışması ve (v) ikiden fazla binanın çarpışması. Buna ek olarak, yığma yapılar arasında meydana gelen çarpışmalar da altıncı bir etkileşim türü olarak ayrı bir grupta değerlendirilmektedir (Cole vd., 2010; Cole vd., 2012). Şekil 1’de 2023 Kahramanmaraş depremlerinde meydana gelen çarpışma hasarlarına ait fotoğraflar verilmiştir.



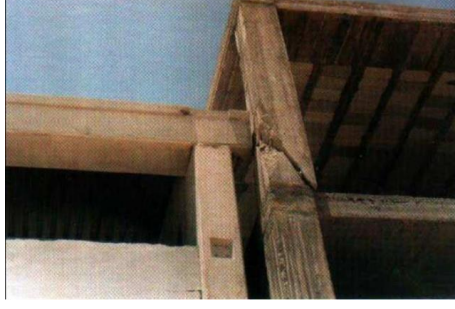
Şekil 1. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde meydana gelen çarpışma kaynaklı hasarlar (Damcı vd. ,2025)

1.2.1. Kütleleri Farklı Olan Binaların Çarpışması

Kütleleri belirgin şekilde farklı olan bitişik binalar arasında meydana gelen çarpışmalarda, genellikle daha hafif yapıların daha fazla etkilendiği düşünülse de bazı araştırmalar bu duruma farklı bir bakış açısı sunmaktadır. Örneğin Chau (2003), çarpışma anında ağır yapıların dinamik tepkilerinin belirgin şekilde arttığını, buna karşın hafif yapıların tepkilerinin azaldığını ifade etmiştir. Öte yandan, literatürde yer alan diğer araştırmalar, daha hafif yapıların çarpışma sırasında ağır yapılar tarafından aktarılan kuvvetler nedeniyle ani hız değişimlerine maruz kaldığını ve bu durumun hafif yapıları yapısal hasara daha duyarlı hale getirdiğini ortaya koymaktadır (Chau, 2006; Cole vd., 2010).

1.2.2. Kat Yükseklikleri Farklı Olan Binaların Çarpışması

Komşu binaların kat yüksekliklerinin farklı olması durumunda, çarpışma etkisi genellikle bir yapının döşemesinin, diğer yapının kolonuna temas etmesiyle meydana gelir. Bu tür etkileşimlerde en önemli yapısal sorun, kolonlarda ani kesme kuvveti artışıdır. Kesme kırılmasının gevrek karakteri nedeniyle, bu çarpışma türü diğerlerine kıyasla daha yıkıcı sonuçlar doğurabilir. Çarpışmanın kolonun orta noktasında gerçekleşmesi durumunda, eşit eğilme momentlerine maruz kalan iki kolon parçası oluşur ve her biri çarpışma kuvvetinin yarısı kadar kesme kuvvetine uğrar. Ancak çarpışma noktası kolon yüksekliği boyunca orta noktanın dışında bir konumdaysa, uzun olan parça eğilme açısından; kısa olan parça ise kesme açısından daha kritik hale gelir (Cole, 2010; Karayannis & Naoum, 2018). Bu çarpışma türü, olumsuz sismik senaryolarda bir yapının toptan göçmesine neden olabilecek kadar etkili olabilir. Bu tür etkileşimlere ait ülkemizden ve dünyadan bazı örnekler Şekil 2'de sunulmaktadır.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



Şekil 2. (a) 1998 Adana depremi, (b) 1999 Gölçük depremi, (c) 1999 Athens depremi, (d) 2009 L'aquila depremi, (e) 2011 Van Depremi (Tezcan,2013; Korkmaz,2015; URL-1,2025; Chenna & Ramancharla, 2018)

1.2.3. Yükseklikleri Farklı Olan Binaların Çarpışması

Farklı yüksekliğe sahip komşu binalar arasında meydana gelen çarpışmalarda, yüksek binanın salınım hareketi daha kısa bina tarafından ani şekilde kısıtlanır. Bu durum, çarpışmanın gerçekleştiği kat seviyesinde hareketin sınırlandığı, üst katlarda ise ani ve geniş salınımların olduğu bir davranış biçimine yol açar. Sonuç olarak, çarpışma noktasının hemen üzerinde yer alan katlarda kamçı etkisiyle birlikte yüksek kesme kuvvetleri ve

deformasyon talepleri oluşur (Cole vd., 2010). Bu etki, yüksek yapının taşıyıcı sistemini ciddi biçimde zorlayarak yerel hasar riskini artırmaktadır. Nitekim, 1985 yılında meydana gelen Mexico City depreminde, bir otel binasında gözlemlenen bu çarpışma türü, yapının ağır hasar görmesine neden olmuştur (Şekil 3).



Şekil 3. 1985 Mexico City depreminde meydana gelen çarpışma hasarları (URL-2, 2025, URL-3, 2025)

1.2.4. Burulma Kaynaklı Komşu Binaların Çarpışması

Deprem etkisi altında yapıların ağırlık merkezine uygulanan yatay kuvvetler, taşıyıcı sistemin rijitlik merkezince dengelenmeye çalışılır. Eğer bir yapıda kütle merkezi ile rijitlik merkezi örtüşmüyorsa, ortaya çıkan eksantirisite nedeniyle burulma etkileri oluşabilir. Burulma etkisinin geliştiği ve yapılar arasında yeterli derz boşluğu bırakılmadığı durumlarda, özellikle köşe kolonlarda noktasal çarpışmalar meydana gelebilir ve bu bölgelerde yoğun hasarlar oluşabilir. Kütle ve rijitlik merkezlerinin çakıştığı simetrik yapılarda, çarpışma daha çok çizgisel temas şeklinde gerçekleşir. Çizgisel çarpışmalarda ise temas yüzeyinin genişliği nedeniyle çarpışma enerjisi yapı boyunca daha dengeli yayılır ve bu da yapısal elemanlarda hasarın daha sınırlı kalmasına katkı sağlar (Çetinkaya, 2011; Sunca, 2023).

1.2.5. İki'den Fazla Binanın Çarpışması

Birden fazla yapının yetersiz derz aralıklarıyla yan yana konumlandığı yerleşim düzenlerinde, deprem sırasında oluşan çarpışmalar genellikle ikili etkileşimlerle sınırlı kalmaz; bunun yerine zincirleme darbe etkileri oluşabilir. Özellikle kenarda yer alan yapılar,

iç kısımdaki binaların oluşturduğu birleşik etkilere maruz kalarak daha fazla hasar görebilir. Bu durum, fiziksel olarak Newton'un beşiği sistemine benzetilebilir (Cole, 2010). Ortadaki yapıların salınımları, darbenin kenardaki binalarda yoğunlaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, çoklu bina konfigürasyonlarında hem kenardaki hem de merkezdeki yapıların çarpışma kaynaklı dinamik etkiler açısından birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Bu bölümde, bitişik nizam yapılar arasında meydana gelen çarpışma olgusu ve bu çarpışmaların yapıların dinamik davranışı üzerindeki etkisini inceleyen önceki araştırmalar özetlenmiştir. İncelemenin ilk kısmında, literatürde yer alan sayısal ve analitik modelleme çalışmalarına odaklanılmış; ikinci kısımda ise, deneysel çalışmalar sistematik olarak ele alınarak ele alınmıştır. Bu kapsamda, farklı sonlu eleman modelleme yaklaşımları, çarpışma etkilerini incelemeye olanak sağlayan çarpışma modelleri ve deneysel veriler karşılaştırmalı şekilde sunulmuştur.

Deprem mühendisliği literatüründe yapıların çarpışma etkisi altında gösterdiği davranışa yönelik araştırmalar, özellikle büyük depremler sonrasında yapılan saha gözlemleriyle önem kazanmıştır. Tarihsel veriler, farklı coğrafyalarda meydana gelen yıkıcı depremler sırasında birbirine bitişik ya da yakın konumda yer alan yapıların çarpışma nedeniyle çeşitli düzeylerde hasar gördüğünü ortaya koymuştur. Bu kapsamda, 1964 Alaska depreminde, Anchorage-Westward Oteli ve West Anchorage Lisesi gibi derzlerle ayrılmış yapılarda orta düzeyde çarpışma hasarları rapor edilmiştir. Özellikle farklı kat yüksekliklerine sahip bölümlerin birleşiminde oluşan çarpışmalar, hasarın şiddetini artırmıştır (Muthukumar, 2003). Benzer şekilde, 1971 San Fernando depremi sırasında Olive View Hastanesi ana binası ile bağımsız olarak inşa edilmiş merdiven kulesi arasında meydana gelen çarpışma, ek yapının kalıcı olarak deformasyon yapmasına neden olmuş (Şekil 4) ve bu etki literatürde dikkate değer bir örnek olarak yer almıştır (Jankowski, 2009).



Şekil 4. 1971 San Fernando depreminde meydana gelen çarpışma sonucu merdiven kulesinin kalıcı deformasyonu (Bertero vd., 1973; Jankowski, 2009)

1980'li yıllarda ise çarpışma etkisinin daha sistematik şekilde raporlandığı depremlerden biri olan 1985 Mexico City depremi sonrasında yapılan incelemelerde, çöken veya ağır hasar gören 330 yapının yaklaşık %40'ında çarpışma etkisi tespit edilmiş, bu vakaların %15'inde çarpışmanın doğrudan göçmeye yol açtığı belirlenmiştir (Rosenblueth ve Meli, 1986). 1989 Loma Prieta depremi, San Francisco Körfez Bölgesi'ndeki geniş bir alanda önemli çarpışma hasarlarına yol açmıştır. Depremde 200'den fazla çarpışma vakası raporlanmış, 500'den fazla yapı bu etkiden zarar görmüştür. Bu olay, merkez üssüne uzak bölgelerde bile ciddi yapısal etkileşimlerin meydana gelebileceğini göstermesi açısından dikkat çekici olmuştur (Kasai vd., 1997).

1990'lı yıllarda meydana gelen büyük depremler de benzer çarpışma senaryolarına sahne olmuştur. 1994 Northridge depremi sonrasında, merkez üssüne yakın bölgelerde yer alan köprülerde çarpışma kaynaklı hasarlar dikkat çekici düzeyde olmuştur. Özellikle I-5/SR-14 kavşağında yer alan bağlantı elemanlarının genleşme derzleri ve kenar ayaklarında önemli düzeyde hasar tespit edilmiştir. Benzer etkiler, SR118 otoyolu ve Santa Clara Nehri Köprüsü gibi yapılarda da gözlemlenmiştir (Muthukumar, 2003). Bir yıl sonra gerçekleşen 1995 Kobe depremine ait saha raporları ise, çarpışma etkisinin bazı köprü mesnetlerinin göçmesine neden olduğunu ve köprü tabliyelerinin çökmesinde rol oynamış olabileceğini göstermiştir (Muthukumar, 2003). Her iki deprem örneği, çarpışma etkisinin köprü yapılarında ciddi yapısal zafiyetlere yol açabileceğini net bir biçimde ortaya koymaktadır.

1999 Kocaeli Depremi sırasında Gölcük'teki altı katlı bir bina ile iki katlı komşu binanın etkileşimi sonucunda, yüksek binada kolonlarda ciddi hasar oluşmuş, iki katlı yapıda ise ikinci katta yer alan kolonlarda kesme tipi hasarlar meydana gelmiştir. Ayrıca, deprem sırasında bazı karayolu köprülerinde tabliye birleşim noktaları ve kenar ayaklarında da çarpışmaya bağlı hasarlar rapor edilmiştir (Youd vd., 2000; Muthukumar, 2003).

Bu tarihsel gözlemler, çarpışma etkisinin yalnızca lokal hasarlara değil, kimi zaman yapının genel stabilitesini tehdit edecek ölçüde kritik hasar oluşumuna yol açabildiğini göstermektedir. Bu nedenle, sayısal, analitik ve deneysel çalışmalarda çarpışma etkilerinin detaylı biçimde ele alınması, özellikle farklı dinamik özelliklere sahip komşu yapıların bir arada bulunduğu kentsel bölgelerde, yapı güvenliğinin doğru değerlendirilebilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

1.3.1. Sayısal ve Analitik Çalışmaları İçeren Literatür Araştırması

Anagnostopoulos (1988), bir sıra boyunca bitişik konumlanmış çok katlı binalar arasında deprem sırasında meydana gelen çarpışmaların yapısal tepki üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla idealize edilmiş modeller üzerinde parametrik bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmasında, her binayı tek serbestlik dereceli sistem olarak modellemiş, çarpışmalar viskoelastik darbe elemanları (yay ve sönümleyici) ile temsil etmiştir. Farklı doğal periyotlara, kütle oranlarına, boşluk mesafelerine ve darbe elemanı özelliklerine sahip sistemlerin doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını, beş farklı deprem kaydı kullanarak incelemiştir. Analizler sonucunda, bitişik nizam binaların sonundaki (köşe) yapıların tek taraflı çarpışmalara maruz kaldıklarını ve genellikle yapısal tepkilerinde önemli artışlar gözlemlendiğini rapor etmiştir. Buna karşın, iç konumda bulunan yapılar iki taraflı çarpışma etkisiyle karşı karşıya kalmalarına rağmen, periyot oranlarına bağlı olarak bu yapıların tepkilerinde azalma da gözlemlenmiştir. Bu durum, geçmiş depremlerde köşedeki binaların daha fazla hasar görmesini açıklayan önemli bir bulgu olarak sunulmuştur. Çalışmanın sonuçlarında boşluk mesafesinin artırılması, darbe elemanlarının sönüm ve rijitlik değerlerinin değiştirilmesi gibi değişkenlerin yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini de değerlendirmiş ve yumuşak malzeme kullanarak çarpışma etkilerinin azaltılabileceğini, ancak bu yöntemin yapısal salınımları baskılamak için yeterli olmadığı belirtmiştir.

Maison ve Kasai (1990), bir yapının rijit komşu binayla çarpışması durumunda ortaya çıkan dinamik davranışları değerlendirmek üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Araştırmalarında, örnek bir hastane binası üzerinde hem serbest titreşim hem de deprem etkisi altında çarpışma analizleri yapmışlardır. Modelleme kapsamında, çarpışmalar binanın belirlenen bir katında oluşmuştur ve temas noktası yerel esneklik yayları (local flexibility springs) ile temsil edilmiştir. Yapının her katına, rijit döşeme kabulü altında üç serbestlik derecesi atanarak dinamik özellikler analiz edilmiştir. Çalışmalarında öncelikle sıfır boşluklu çarpışma durumlarını incelemiş ve çarpışmanın yapının üst katlarında yer değiştirme tepkilerini azaltırken, kat ötelemeleri, kesme kuvvetleri ve devrilme momentlerini önemli oranda artırdığı gözlemlenmiştir. Örneğin, 13. katta çarpışmanın dikkate alındığı durumda, yer değiştirme %43 azalmış ancak kat ötelemesi %104, kesme kuvveti %154 ve devrilme momenti %255 oranında artmıştır. Ayrıca yapılan analizlerde, çarpışma seviyesinin yüksekliğinin, yay rijitliğinin ve binalar arası ayırım mesafesinin tepkiler üzerindeki etkilerini detaylı biçimde değerlendirmişlerdir. Çarpışma seviyesinin üst katlara taşınmasıyla birlikte, yapı tabanında oluşan kesme kuvvetlerinin belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumu, çarpışma sonucu meydana gelen kesme dalgalarının yapı tabanına yansıyarak birleşmesiyle açıklamışlardır. Rijit yay kullanımının ise çarpışma kuvvetlerini ve buna bağlı olarak oluşan yapısal tepkileri önemli ölçüde artırdığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, çalışmada çarpışma etkilerinin dikkate alınmamasının yapısal analiz ve tasarımda önemli yetersizliklere neden olabileceği vurgulanmış; benzer yapısal özelliklere sahip sistemler için elde edilen analiz sonuçlarının genelleştirilebileceği ifade etmişlerdir.

Maison ve Kasai (1992), esnek iki binanın yetersiz derz aralığı nedeniyle deprem sırasında çarpışması sonucu oluşan yapısal tepkileri incelemişlerdir. Analizler, çok serbestlik dereceli bir sistemin modellenmesiyle gerçekleştirilmiş; yapı modelleri SUPER-ETABS yazılımıyla oluşturulmuş ve çarpışma analizleri SLAM-2 programı kullanılarak yürütülmüştür. Çalışmada, 15 katlı mevcut bir yapı (bina A) ile 8 katlı varsayımsal bir yapı (bina B) modellenmiş; çarpışmanın, bina A'nın 8. katı ile bina B'nin çatı katı arasında gerçekleştiği kabul edilmiştir. Binalar arasındaki etkileşim, tekil bir lineer elastik yay ile temsil edilmiştir. 1940 El Centro deprem kaydı kullanılarak yapılan analizler sonucunda, çarpışmanın özellikle daha uzun ve hafif olan bina A'da yer değiştirme, kat ötelemesi, kesme kuvveti ve devrilme momentlerinde belirgin artışlara yol açtığı gözlemlenmiştir. Bazı katlarda bu artışlar %100'ün üzerine çıkmıştır. Yürütülen parametrik çalışmalar, yapıların kütle oranı, aralarındaki derz açıklığı, temas yayının rijitliği ve sönüm oranının yapısal tepki üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Kütle farkı arttıkça, daha hafif olan yapının daha

olumsuz etkilendiği; derz açıklığı arttıkça çarpışma etkilerinin azaldığı, ancak bu azalmanın doğrusal olmadığı belirlenmiştir. Temas yayının rijitliği ve sönüm oranı ise yer değiştirme tepkileri üzerinde sınırlı bir etkiye sahiptir. Sonuç olarak, çalışma çarpışmanın yalnızca lokal hasarlara neden olmakla kalmayıp, tüm yapı boyunca önemli dinamik etkilere yol açabileceğini ortaya koymuştur.

Papadrakakis vd. (1996), bitişik binalar arasında deprem sırasında meydana gelen çarpışma etkilerini, üç boyutlu sonlu eleman modeli kullanarak kapsamlı biçimde analiz etmişlerdir. Önceki çalışmalarda genellikle iki boyutlu ve sınırlı temas noktalarıyla yapılan modellere karşılık, bu çalışmada bina yüksekliği boyunca farklı kat seviyelerinde birden fazla temas bölgesi dikkate alınmıştır. Temas koşulları, ara yüzey elemanları yerine Lagrange çarpanları yöntemiyle formüle edilmiştir. Analizlerde El Centro ve Kalamata depremlerine ait ivme kayıtları kullanılmış ve dört yapı konfigürasyonu değerlendirilmiştir: (i) iki binanın çarpışması, (ii) dik doğrultuda yerleşmiş üç binanın çarpışması, (iii) plan düzleminde rijitlik düzensizliği bulunan iki bina ve (iv) benzer düzensizliklere sahip üç binanın çarpışması. Çalışma bulguları, çarpışma durumunda rijit yapılarda şekil değiştirme enerjisinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Bazı senaryolarda bu artış, çarpışmasız duruma göre 68 kata kadar ulaşmıştır. Özellikle rijitlik düzensizliğine sahip konfigürasyonlarda burulma etkisinin artmasıyla, rijit yapının enerji talebinde %40'a varan yükselmeler gözlemlenmiştir. Buna karşın, esnek yapılarda çarpışmanın çoğunlukla sönümleyici etkiler yarattığı belirlenmiştir.

Jankowski (2005) çalışmasında, depremler sırasında meydana gelen yapısal çarpışmaları doğrusal olmayan viskoelastik yaklaşımla modellemeye odaklanmıştır. Geliştirdiği modelin güvenilirliğini değerlendirmek için çelik, beton gibi farklı malzemelerden oluşan yapı çiftlerinin çarpışma davranışlarını hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle incelemiştir. Jankowski, çarpışma kuvvetlerinin modellenmesine yönelik üç farklı yaklaşımı karşılaştırmıştır: (i) doğrusal viskoelastik model (Kelvin-Voigt tipi), (ii) Hertz temelli doğrusal olmayan elastik model ve (iii) önerdiği doğrusal olmayan viskoelastik model. Doğrusal viskoelastik ve doğrusal olmayan elastik modellerle kıyaslandığında, en yüksek doğruluk oranına doğrusal olmayan viskoelastik modelin ulaştığını belirtmiştir. Ayrıca hem doğrusal hem de doğrusal olmayan viskoelastik modellerin çarpışma kuvveti-zaman eğrilerinin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğunu ifade etmiştir. Ancak, doğrusal viskoelastik modelde çarpışma sonrası ayrılma anında fiziksel olarak açıklanamayan negatif kuvvet değerlerinin ortaya çıktığına dikkat çekmiştir. Düşük

Çarpışma katsayısı gerektiren durumlarda doğrusal olmayan elastik modelin uygun olmadığını; ancak enerji kaybının ihmal edilebilir olduğu koşullarda, bu modelin doğrusal viskoelastik modele kıyasla daha güvenilir sonuçlar verebileceğini belirtmiştir. Ayrıca, doğrusal viskoelastik modelin hesaplama açısından daha pratik olduğunu ve bilgisayar destekli analizlerde kolaylıkla uygulanabildiğini ifade etmiştir. Bu model, doğrusal olmayan alternatiflere kıyasla daha az hesaplama yükü gerektirmekte ve karmaşık iteratif     mlere ihtiyaç duymamaktadır.

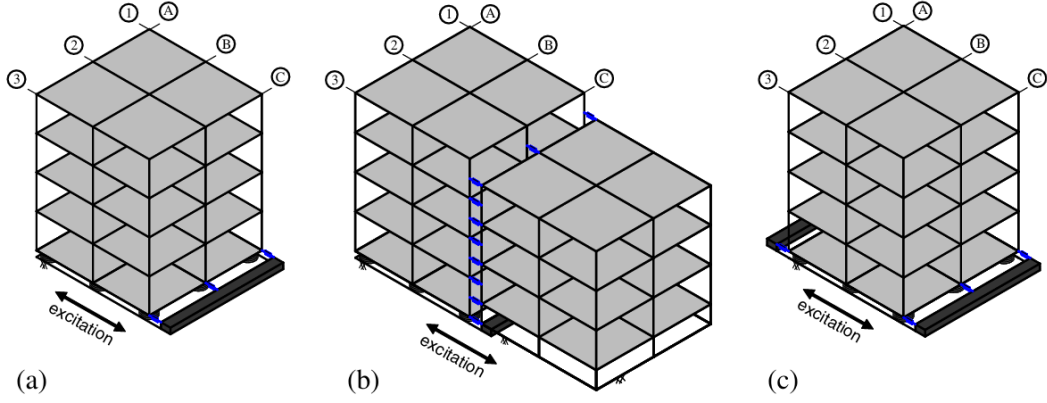
Jankowski (2009), 1971 San Fernando Depremi sırasında Olive View Hastanesi ana binası ile bağımsız merdiven kulesi arasında meydana gelen çarpışmayı, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle detaylı biçimde incelemiştir. Çalışmanın amacı, farklı dinamik özelliklere sahip bu iki yapının deprem sırasında etkileşimi sonucu oluşan yapısal davranışı doğrusal olmayan analizler yoluyla değerlendirmektir. Modellerde, betonarme yapı elemanları için betonun döngüsel yükler altındaki rijitlik kaybını ve donatı çeliğinin elastoplastik pekleşme davranışını içeren malzeme modelleri kullanılmıştır. Yapılar arasındaki çarpışma, her kat seviyesine yerleştirilen boşluk-sürtünme etkileşimli özel temas elemanlarıyla modellenmiştir. Deprem etkisi olarak San Fernando depremine ait yer hareketi kayıtları uygun şekilde    eklendirilerek modele dahil edilmiştir. Analiz sonuçları, daha hafif olan merdiven kulesinin hem yatay deplasman hem de burulma açısı bakımından çarpışmadan ciddi biçimde etkilendiğini, buna karşılık daha ağır ve rijit olan ana binanın yapısal tepkisinde çarpışmanın çok sınırlı bir etkisinin olduğunu göstermiştir. Özellikle merdiven kulesinin boyuna ve burulma yönlerindeki tepkilerinin belirgin şekilde arttığı, bu durumun kulenin tabanında ciddi plastik şekil değişimlerine yol açtığı g r lm şt r. Çalışma,  arpışma etkilerinin özellikle hafif yapılarda hasar düzeyini önemli     de artırabileceğini ortaya koyarken, daha ağır yapıların bu etkileşimden görece daha az zarar gördüğünü belirtmiştir.

Çetinkaya (2011), aynı kat ve yapı y ksekliliğine sahip komşu binaların 1940 El Centro depremi etkisi altındaki çarpışma davranışlarını zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemiyle incelemiştir.  alışmasında   er, ikişer ve tek katlı yapı gruplarını ele almıştır. Binalar arasındaki derz boşluğunu ise mevcut yönetmelik koşullarını dikkate alarak belirlemiştir. Çarpışmayı temsil etmek üzere dört farklı yay modeli kullanmıştır: doğrusal elastik, doğrusal viskoelastik, doğrusal olmayan elastik (Hertz modeli) ve doğrusal olmayan elastik ile doğrusal viskoelastik yay modelinin özelliklerini bir araya getiren birleşik model. Analizler sonucunda, yönetmeliğin belirttiği minimum derz mesafesinin yetersiz kaldığını

ve çarpışmaların özellikle üst kat seviyelerinde gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Doğrusal olmayan yay modeliyle yapılan analizlerin, yapı etkileşimlerini en net biçimde ortaya koyduğunu belirtmiştir. Ayrıca, çarpışmanın önlenmesi için yeterli boşluk bırakılmasının zorunlu olduğunu vurgulamış, eğer yeterli boşluk sağlanamıyorsa, çarpışma ihtimali olan bölgelerde enerji yutma kapasitesi yüksek malzemelerin kullanılmasını önermiştir.

Jankowski (2012), 1971 San Fernando depremi sırasında hasar gören bir hastane binası ile bu binadan derz ile ayrılmış olan merdiven kulesi arasındaki çarpışma etkisini hem üniform hem de yapıya farklı noktalardan ulaşan değişken yer hareketi etkileri altında incelemiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizler, yer hareketinin yapının farklı bölümlerine farklı zamanlarda ulaşmasının çarpışma davranışları üzerinde belirgin değişikliklere yol açtığını ortaya koymuştur. Bu durumun, özellikle çarpışmanın şiddeti ve meydana geldiği yapı elemanları üzerindeki etkiler açısından kritik olduğu vurgulanmıştır.

Pant ve Wijeyewickrema (2012), 4 katlı tabanında izolatör bulunan betonarme bir binanın, tabanında izolatör bulunmayan komşu, 4 katlı bir bina ve istinat duvarı ile çarpışması durumundaki yapısal performansını değerlendirmek amacıyla üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, yapıların hem malzeme hem de geometrik nonlineerlikleri dikkate alınmış; çarpışma etkisi, modifiye edilmiş Kelvin–Voigt modeli aracılığıyla temsil edilmiştir. İncelenen yapı, kurgu olarak üç farklı konfigürasyonda ele alınmış ve farklı boşluk mesafeleri altında analiz edilmiştir. Şekil 5'te gösterildiği gibi konfigürasyon A taban izolatörlü bir bina ve bir tarafında yer alan istinat duvarından; konfigürasyon B taban izolatörlü bir bina ve bir tarafında hem istinat duvarı hem de taban izolatörü bulunmayan bir binadan; konfigürasyon C taban izolatörlü bir bina ve her iki tarafında bulunan istinat duvarlarından oluşmaktadır. Çalışmada, katlar arası öteleme oranları %0.2–%0.5 arası yapısal olmayan hasar, %0.5–%1.5 arası orta düzeyde yapısal hasar ve %1.5–%3 arası ciddi yapısal hasar olarak sınıflandırılmış, %3'ün üzerindeki değerler ise kat göçmesi olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, konfigürasyon C'de çarpışmanın birinci kat seviyesinde kat ötelemelerini ciddi oranda artırdığı görülmüştür. Maksimum katlar arası öteleme oranı, %3.2'ye ulaşmış ve ilk kat göçmüştür. Ayrıca, iki taraftan istinat duvarı ile çarpışmanın olduğu durumun, tek taraflı çarpışmadan daha az kritik olduğu belirtilmiştir. Bina kolonlarında kayma kapasitesinin aşılmadığı ve oluşan hasarın eğilme kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma taban izolatörü kullanılan binalarda boşluk mesafesinin yetersiz bırakılması durumunda yalıtım sisteminin sağladığı avantajların büyük ölçüde ortadan kalkabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 5. (a) Konfigürasyon A; (b) konfigürasyon B; (c) konfigürasyon C (Pant ve Wijeyewickrema, 2012)

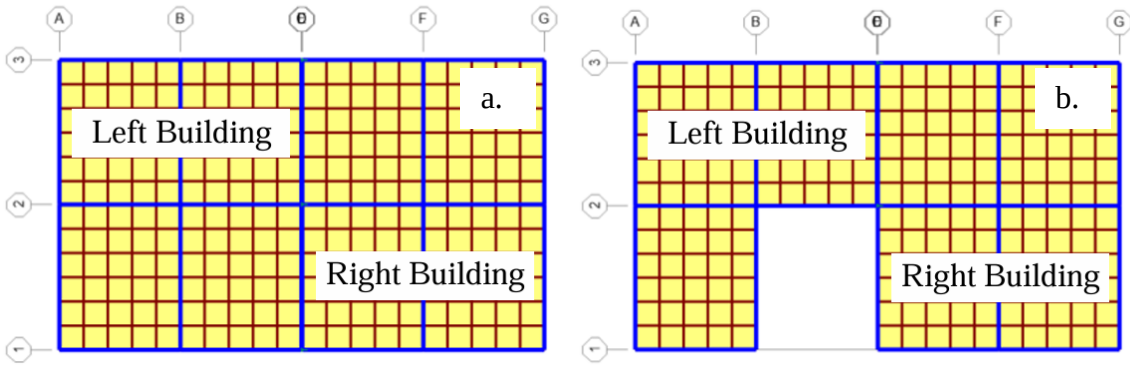
Rajaram ve Kumar (2012) çalışmasında, farklı doğal titreşim periyotlarına sahip komşu binalar arasında çeşitli yönetmeliklerin önerdiği derz boşluklarının yeterliliğini, zaman tanım alanında analizlerle değerlendirmişlerdir. Analizlerde dünya genelinde yaygın olarak kullanılan çeşitli deprem yönetmelikleri dikkate alınmış; özellikle FEMA 273 (1997) ve NBC Peru E030-2003 yönetmeliklerinin, diğer yönetmeliklerle karşılaştırıldığında daha geniş boşluk mesafeleri öngördüğü belirlenmiştir. Ancak sonuçlar, kullanılan yer hareketinin karakteristiklerine bağlı olarak, yönetmeliklerin önerdiği minimum mesafelerin her zaman yeterli olmayabileceğini göstermiştir.

Yaghmaei-Sabegh ve Jalali-Milani (2012), yakın ve uzak fay kaynaklı yer hareketleri için yapı periyoduna bağlı olarak çarpışma kuvveti spektrumları oluşturmuşlardır. Çalışmada, tek serbestlik dereceli sistemler kullanılmış; çarpışma etkisi doğrusal olmayan viskoelastik modelle temsil edilmiş ve kütle ile sönüm oranları değişken parametreler olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen çarpışma kuvveti spektrumunun, komşu yapıların çarpışma riskine karşı güvenli tasarımı için etkili bir mühendislik aracı olabileceği belirtmişlerdir.

Turhan (2015), bitişik binalar arasında meydana gelen çarpışmaları azaltmak amacıyla viskoz sönümleyicilerin en uygun yerleşim düzenini araştırmıştır. Toplam sönüm katsayılarının farklı değerleri için optimizasyon analizleri yaparak, sönümleyicilerin konumlarının yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, uygun yerleştirilen viskoz sönümleyicilerin çarpışma riskini önemli ölçüde azaltabileceğini ortaya koymuştur.

İnel vd. (2015), aynı sırada yer alan iki ve üç binanın çarpışma etkilerini incelemiş; analizler sonucunda Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY,2007)'de öngörülen derz boşluklarının çoğu durumda yetersiz kaldığını ve yapı performans değerlendirmelerinde çarpışma etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Akköse ve Sunca (2016), plan düzensizliğine sahip betonarme binaların yakın ve uzak fay yer hareketlerine maruz kalmaları durumunda, çarpışma etkilerini değerlendirmiştir. SAP2000 yazılımı kullanılarak oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modellerinde, yapılar arası çarpışma, Hertz temelli doğrusal olmayan yay modeliyle temsil edilmiştir. Loma Prieta depremine ait hem yakın hem de uzak fay kayıtları analizlerde kullanılmıştır. İlk analiz, planında düzensizlik bulunmayan iki yapı arasında gerçekleştirilmiş ve yakın fay etkisi altında çarpışma kuvvetlerinin uzak fay etkisine kıyasla %12 oranında arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 6a). İkinci analizde ise, planında düzensizlik bulunan bir yapı ile simetrik bir yapının etkileşimi değerlendirilmiş ve bu durumda çarpışma kuvvetlerinin %59 oranında daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 6b). Elde edilen sonuçlar, özellikle plan düzensizliği bulunan yapılarda ve yakın fay etkilerinin söz konusu olduğu durumlarda, yeterli derz mesafesi sağlanmamasının ciddi yapısal hasarlara yol açabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 6. Akköse ve Sunca (2016) tarafından dikkate alınan planda düzenli ve düzensiz olan yapılar

Tekin ve Pala (2016), taşıyıcı sisteminde düşey eleman süreksizliği bulunan bitişik nizam betonarme binaların sismik çarpışma etkisi altındaki davranışını incelenmiştir. Farklı derz mesafeleri için yapılan zaman tanım alanı analizleri, düşey süreksizliklerin çarpışma kuvvetlerini artırdığını ve bu kuvvetlerin etki seviyesinin, mesafeye ve çarpışma katına bağlı

olarak değiştiğini ortaya koymuştur. Özellikle yetersiz derz mesafesi durumunda yapıların birden fazla katında çarpışmalar meydana gelmiş ve kuvvet artışları belirginleşmiştir. B3 düzensizliği bulunan yapıların daha yüksek çarpışma kuvvetlerine maruz kaldığı ve bu etkinin sadece yer değiştirme değil, yapısal performans üzerinde de olumsuz etkiler oluşturabileceği tespit edilmiştir. Mevcut yönetmelikte önerilen minimum derz açıklığının, bu tür düzensizliklerin bulunduğu durumlar için yetersiz kaldığı anlaşılmıştır.

Crozet vd. (2017), komşu binaların deprem sırasında verdiği yapısal tepkilerin hem yapı özelliklerine hem de deprem parametrelerine bağlı olarak nasıl değiştiğini araştırmıştır. Bu kapsamda, Monte Carlo simülasyonları kullanılarak detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Çalışmada; yapılar arasındaki kütle ve doğal frekans oranları, boyutsuz ana uyarım frekansı ve geri sıçrama katsayısı gibi değişkenlerin etkisini ölçmek amacıyla duyarlılık indeksleri hesaplanmıştır. Ayrıca, arpışma etkisi altında yapıların doğrusal olmayan davranışları da analiz kapsamına alınmıştır. Çarpışmanın hesaba katıldığı ve katılmadığı durumlar karşılaştırılarak, bu etkinin maksimum i kuvvetlerde ve yapının doğrusal olmayan taleplerindeki artışlarda nasıl farklılık yarattığı ortaya konmuştur.

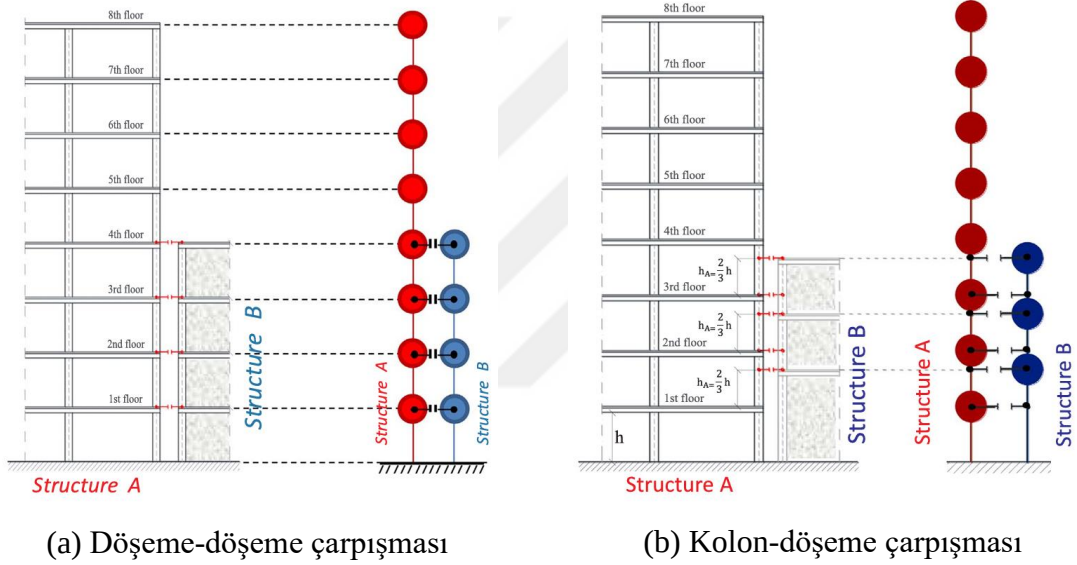
Elwardany vd. (2017), üç veya daha fazla bina arasında meydana gelen çarpışmalarda dolgu duvarların etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, dolgu duvarlar yapıya eşdeğer diyagonal çubuk elemanlar ile dahil edilerek modellenmiştir. Yapılan analizler, dolgu duvarların yapıların sismik tepkisini belirgin şekilde etkileyebileceğini ve sismik yükler altında oluşan çarpışmaların yapısal davranış üzerinde önemli sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir. Ayrıca, dolgu duvarların yapının farklı bölgelerine nasıl yerleştirildiğinin, genel yapı davranışı üzerinde kritik bir rol oynayabileceğini vurgulanmışlardır.

Köksal ve Karaca (2017), patlatma kaynaklı yer hareketlerinin komşu binalarda çarpışmaya neden olabilecek etkilerini araştırmışlardır. İki katlı yığma binalar, ANSYS yazılımı kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş; patlatma kaynaklı yer hareketleri ise BlastGM programı ile yapay olarak üretilmiştir. Tamamen bitişik yapılar ile kısmen bitişik yapıları karşılaştırmış; çarpışmanın, yer değiştirmeleri ve gerilmeleri önemli ölçüde artırdığını görmüşlerdir. Sonuç olarak, yalnızca depremlerde değil, patlatma gibi diğer dinamik etkiler karşısında da yapılar arasında yeterli derz boşluğu bırakılmasının gerekliliğini vurgulamışlardır.

Pala ve Tekin (2017), çalışmalarında zayıf kat düzensizliği durumunu dikkate alarak bitişik nizam yapılar arasındaki çarpışma tepkilerini incelemişlerdir. Zayıf kat düzensizliğine sahip olan bu yapılar arasında meydana gelen çarpışma kuvvetlerinin

çoğunlukla düzensizliğin bulunmadığı durumlara göre daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir.

Karayannis ve Naoum (2018), sınırlı temas yüzeylerinden kaynaklanan asimetrik çarpışmaların çok katlı betonarme yapılarda burulma etkisi ve taşıyıcı sistem elemanlarına olan etkilerini incelemişlerdir. 200'den fazla doğrusal olmayan analiz sonucunda, hem döşeme-döşeme hem de döşeme-kolon çarpışmalarında, önemli burulma momentleri oluştuğu, çarpışmanın kesme kuvvetlerini ciddi biçimde artırarak kolon kapasitesini aştığı belirlenmiştir (Şekil 7). Özellikle kolonların çarpışma noktasında kırılğan kesme hasarlarının meydana gelebileceği, bu nedenle asimetrik çarpışma etkilerinin yapı tasarımında mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 7. Karayannis ve Naoum, (2018) tarafından dikkate alınan çarpışma senaryoları

Kamal vd. (2018), düşük ve orta yükseklikteki betonarme binalarda meydana gelen çekiçleme etkisinin, yapıların sismik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 1975 ve 1998 yönetmeliklerine göre oluşturdukları dört ve yedi katlı yapı modelleri, farklı boşluk mesafeleri ile zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlere tabi tutulmuştur. Çalışma, çekiçleme etkisinin göz ardı edilmesinin yapısal performans değerlendirmelerinde ciddi eksikliklere yol açabileceğini göstermiştir.

Güler (2018), bitişik binalar arasındaki çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla çarpışma bölgelerine neopren kauçuk elemanlar yerleştirmiş ve bu elemanların sismik etkileşim üzerindeki etkilerini incelemiştir. Eksenel rijitlik değerlerinin belirlenmesinde

ampirik formüller kullanmıştır. Yapılan analizler, kauçuk elemanların çarpışma sırasında oluşan enerjiyi sönümleyerek çekiçleme etkilerini azaltabileceğini ortaya koymuştur.

Abdel Raheem vd. (2018), bitişik binalar arasında deprem etkisiyle oluşan çarpışmanın neden olduğu hasarların değerlendirilmesine yönelik yönergeler oluşturmak ve mevcut yönetmeliklerin revizyonuna katkı sağlamak için dokuz farklı gerçek deprem kaydı kullanarak çeşitli kat yükseklikleri, yapı dizilimleri ve ayrılma mesafeleri için maksimum yer değiştirme, ivme ve kat kesme kuvvetlerini belirlemişlerdir. Analizler çarpışmanın özellikle dış konumda bulunan binalarda ivme ve kesme kuvvetlerini önemli ölçüde artırdığını, buna karşılık kısa binalarda yer değiştirme değerlerinin sınırlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, dinamik özellikleri benzer olan yapılar arasında rezonans etkisinin çarpışma riskini artırdığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, mevcut yönetmeliklere sismik derz mesafesi gereksinimlerinin ve çarpışma etkilerinin dikkate alındığı yeni düzenlemelerin eklenmesi önerilmiştir.

Farahani vd. (2019), çok katlı betonarme çerçeve sistemlerin deprem sırasında eksantrik çarpışma etkisi altında nasıl burulma davranışı sergilediğini incelemişlerdir. Çalışmalarında, plan boyutlarında %0.00 ile %30.00 arasında değişen eksantrisite oranlarını, farklı kat yüksekliklerini ve derz mesafelerini dikkate alarak kapsamlı analizler yürütmüşlerdir. Yapılan doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizlerinde; çarpışma kuvvetleri, göreceli kat ötelemeleri, kat kesme kuvvetleri ve plastik dönmeler temel karşılaştırma ölçütleri olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, eksantrik yerleşimin burulma etkisini artırdığını ve bunun çarpışma ile birleştiğinde yapının doğrusal olmayan tepkilerini önemli ölçüde büyüttüğünü göstermiştir. Ayrıca, mevcut yönetmeliklerde önerilen derz mesafelerinin, eksantrik durumlarda yetersiz kalabileceği vurgulanmıştır.

Karabork ve Aydın (2019), dinamik özellikleri farklı bitişik yapıların deprem anında çarpışmasını önlemeye yönelik olarak viskoz sönümleyicilerin yerleşimine ilişkin yeni bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada, klasik, merdiven ve diyagonal olmak üzere üç farklı sönümleyici konfigürasyonu değerlendirilmiş ve bu sönümleyiciler, komşu iki yapı arasında çarpışmayı engellemek amacıyla modellenmiştir. Optimum yerleşimin belirlenebilmesi için zaman tanım alanı analizleri ile sayısal optimizasyon tekniklerinin bir arada kullanıldığı özgün bir algoritma önerilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin etkili bir şekilde çarpışma riskini azaltabildiğini ve uygun sönümleyici yerleşiminin belirlenmesinde başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Pala ve Şaşmaz (2019), kat seviyeleri farklı binalarda döşeme kalınlığına bağlı olarak değişen kat kütesinin çarpışma kuvveti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. SAP2000 programı kullanılarak, aralarındaki derz mesafesi 0, 1, 2 ve 3 cm olan toplam 28 farklı model oluşturulmuş ve her iki bina için döşeme kalınlıkları değiştirilerek yapıların dinamik davranışları analiz edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizlerde 1940 El Centro deprem kaydı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, derz mesafesi 3 cm olduğunda yapılar arasında çarpışma meydana gelmediğini, döşeme kalınlığının artmasıyla birlikte yapıların periyot değerlerinde artış olduğunu ve bu durumun çarpışma kuvvetlerinin büyüklüğü üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. En yüksek çarpışma kuvveti, 14 cm döşeme kalınlığına sahip yapının tamamen bitişik durumda olması halinde 12 m kat seviyesinde meydana gelmiştir. Ayrıca, çarpışmanın döşeme seviyesinde değil de diğer yapının kolonuna denk gelmesi durumunda, 1360 kN gibi büyük kuvvetlerin ciddi kesme hasarlarına yol açabileceği ifade edilmiştir. Bulgular sonucunda, özellikle kat seviyeleri farklı olan bitişik binalarda yeterli derz boşluğu bırakılmasının hayati önem taşıdığı ortaya konmuştur.

Mazza ve Labernarda (2020), taban izolasyonlu betonarme bir yapı ile içerisinde yer alan ankastre mesnetli asansör shaftı arasındaki olası çarpışma etkilerini araştırmışlardır. Yapı, elastomerik ve kayar mesnetlerden oluşan hibrit bir izolasyon sistemiyle izole edilmiş olup, asansör shaftı bu izolasyon düzlemini kesmektedir. Bina ile asansör shaftı arasında fiziksel bir boşluk bırakılmış olsa da sismik hareketler sırasında bu iki sistem arasında çarpışmaların meydana gelebileceği belirtilmiştir. Bu potansiyel çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla, araştırmacılar bina ile asansör shaftı arasına manyetik sönümleyici bağlantı yerleştirilmesini önermişlerdir.

Çaycı ve Akpınar (2021), farklı zemin koşulları altında zemin-yapı etkileşimini de dikkate alarak bitişik binalar arasında meydana gelen çarpışma etkilerini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, çarpışmanın yer değiştirme talebinde çarpışma yönünde azalma, serbest yönde ise artış eğilimi yarattığını, maksimum görelî kat ötelemesi oranlarının çoğu durumda çarpışma etkisiyle arttığını gözlemlemişlerdir. Çalışma, çarpışmanın sadece yapıların genel dinamik davranışını değil, aynı zamanda hasar mekanizmalarını da etkilediğini ortaya koymuştur. Özellikle plastik dönme taleplerinin kolon ve kiriş elemanları arasında çarpışmaya bağlı olarak değiştiği ve bunun yapısal hasar dağılımını etkilediği sonucuna varılmıştır.

Çetin ve Demir (2021), orta yükseklikteki bitişik yapılar arasındaki çarpışma etkisini, yapı rijitliği, kat yüksekliği ve derz boşluğu parametrelerini dikkate alarak incelemişlerdir.

İki farklı yapı modeli için, döşeme-döşeme ve döşeme-kolon çarpışma senaryoları altında analizler gerçekleştirilmiş; yer değiştirmeler ve çarpışma kuvvetleri Kocaeli depremi verisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizler, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne göre önerilen minimum derz boşluklarının birçok senaryoda yeterli olduğunu, ancak 4 cm altındaki boşluklarda ciddi çarpışma kuvvetlerinin oluştuğunu göstermiştir.

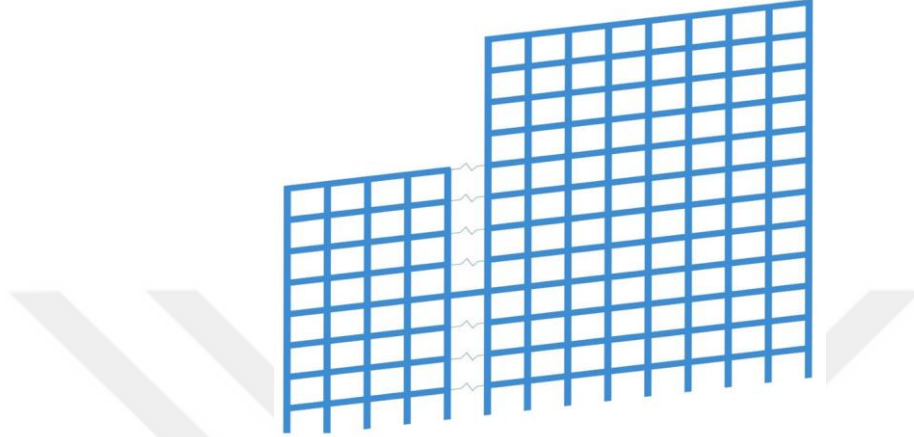
Kamal ve İnel (2022), farklı zemin türlerine sahip düşük ve orta katlı bitişik betonarme binalar için gerekli minimum derz mesafesini belirlemek amacıyla 3696 doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Analizler sonucunda farklı zemin türleri için geçerli olacak şekilde, binaların periyotları, zemin büyütme katsayıları ve spektral ivmeler gibi parametrelere dayanan yeni bir ampirik denklem önermişlerdir ve bu denklemin çarpışma riskini azaltmada etkili olduğu ifade edilmiştir.

Kamal vd. (2022), yumuşak zeminler üzerine inşa edilen orta katlı betonarme binaların deprem etkisi altındaki davranışını, farklı etkileşim varsayımları altında incelemişlerdir. Çalışmada, üç boyutlu ve süneklik düzeyi yüksek bina modelleri kullanılarak yapı-zemin-yapı etkileşimi, yalnızca zemin-yapı etkileşimi ve ankastre mesnet kabulü karşılaştırılmıştır. Yapılan kapsamlı analizler sonucunda, zemin koşulları zayıf olduğunda bitişik binaların birbirini etkilediği, bu nedenle yapıların çevresinden bağımsız şekilde değerlendirilmesinin yeterli olmadığı görülmüştür. Ayrıca, çarpışma riski taşıyan durumlarda, kat sayısından bağımsız olarak hem zeminle hem de komşu yapılarla olan etkileşimlerin dikkate alınmasının gerekli olduğu ortaya konmuştur.

Miari ve Jankowski (2022b), bitişik yapıların döşeme-kolon çarpışmasına maruz kaldığı durumlarda, farklı zemin türlerinin yapısal tepki üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Gerçekleştirilen analizler, çarpışmanın meydana geldiği kolonlarda kesme taleplerinin önemli ölçüde arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca zemin özellikleri zayıfladıkça bu artışın daha belirgin hale geldiği ve bazı durumlarda kolonların kesme kapasitesinin aşılmasıyla birlikte gevrek hasar oluşabileceği sonucuna varılmıştır.

Kamel (2023), çarpışma etkilerini azaltmaya yönelik olarak yapıların belirli katlarına yerleştirilen bağ kirişlerinin etkinliğini incelemiştir. Özellikle farklı kat sayısına sahip bitişik binalar arasında üç farklı bağlantı düzeni değerlendirmiştir (Şekil 8). Her bir bağlantı durumu için 5 mm ve 10 mm olmak üzere iki farklı derz mesafesi kullanılarak, üç farklı yer hareketi altında doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizleri gerçekleştirmiştir. Analiz sonuçları, bağ kirişi uygulamasının özellikle orta kat seviyesinde uygulandığında çarpışma kuvvetlerinde %70–80'e varan azalmalar sağladığını göstermiştir. İlk kat seviyesinde yapılan

bağlantılar ise çarpışma kuvvetlerinde %40–50 oranında azalma sağlamıştır. En dikkat çekici bulgu ise, bağ kirişinin düşük katlı binanın son katına yerleştirildiğinde çarpışma kuvvetlerinin tamamen ortadan kalkmasıdır. Bu çalışma, özellikle mevcut yapılarda uygulanabilirliği yüksek bir yöntem olan bağ kirişi kullanımının, yapılar arası sismik etkileşimi azaltmada etkili bir çözüm sunduğunu göstermiştir.



Şekil 8. Kamel (2023) tarafından bağ kirişleri ile çarpışma etkilerinin azaltılmasına yönelik gerçekleştirilen çalışma

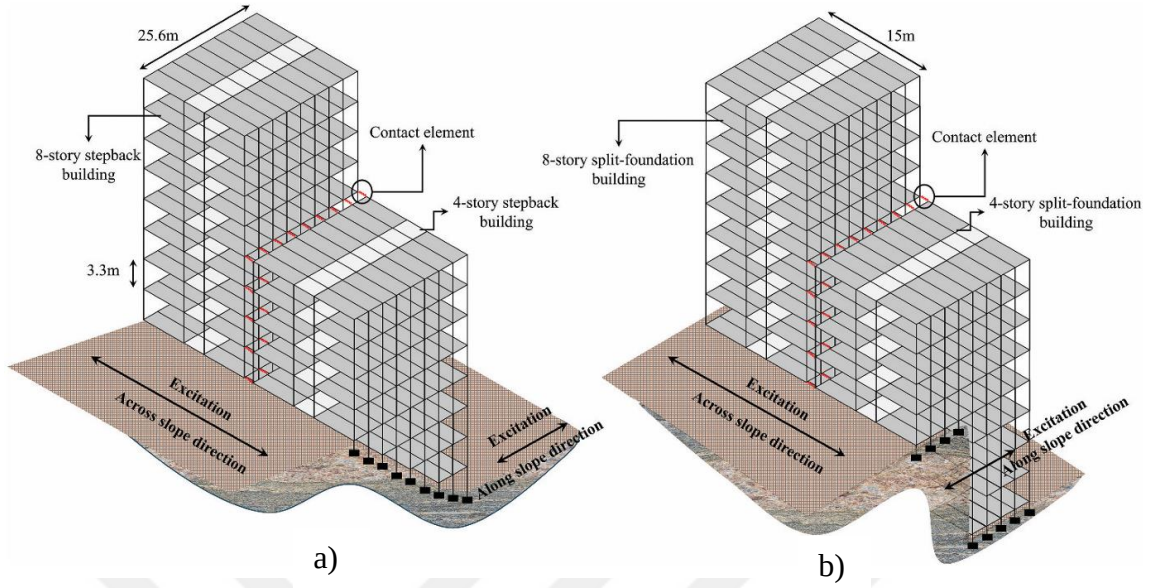
Bantilas vd. (2023), bitişik yapıların çarpışma etkisinin çok katlı betonarme çerçeve yapıların sismik performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. 8 katlı bir betonarme çerçeve yapının, kat sayısı 1 ila 4 arasında değişen rijit komşu yapılarla olan etkileşimi değerlendirilmiştir; her senaryo için altı farklı derz mesafesi tanımlanarak toplam 48 yapı düzeni oluşturulmuştur. Her bir düzen için elde edilen kırılma eğrileri, sismik taleplerin arttığını göstermiştir. Bu artışın, özellikle komşu yapının yüksekliğinin artması, derz mesafesinin azalması ve yer hareketi şiddetinin artması durumlarında daha belirgin hale geldiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, Eurocode 8 tarafından önerilen minimum derz mesafesinin bazı durumlarda yetersiz kaldığı ortaya konmuştur.

Özer (2024), burulma düzensizliği ve çarpışma etkisinin orta katlı betonarme binaların sismik davranışı üzerindeki birleşik etkisini incelemiştir. Bu kapsamda, beş ve dokuz katlı düzenli ve düzensiz yapı kombinasyonlarıyla toplam 176 doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmiştir. Burulma düzensizliği, kütle ve rijitlik merkezleri arasındaki eksantriklik; çarpışma etkisini ise 2 cm derz mesafesiyle Kelvin-Voigt bağlantı elemanı kullanılarak modellenmiştir. Analizler neticesinde, özellikle rijitlik merkezleri aynı yönde konumlanan düzensiz yapılarda yer değiştirme, göreceli kat ötelemesi, hasar oranı ve burulma katsayısının belirgin şekilde arttığını belirtilmiştir. Ayrıca yeterli derz mesafesinin

belirlenmesinde burulma ve çarpışma etkilerinin birlikte ele alınmasının gerekliliği vurgulanmıştır.

Osman ve Salem (2025), farklı yükseklik ve açıklıklara sahip çelik çerçeve sistemli yapıların genleşme derzi genişliğinin azaltılmasının, deprem sırasında çarpışma kaynaklı hasar seviyeleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, farklı açıklıklara sahip iki bina bloğundan oluşan bir prototip yapı modellenmiş ve bu yapı, farklı genişlikteki sismik derz aralıklarıyla çeşitli yer hareketlerine maruz bırakılmıştır. SAP2000 ile yapılan doğrusal olmayan analizlerde, farklı genişlikteki sismik derz açıklıklarının çarpışma sayısı, kuvveti, plastik mafsall oluşumu ve yapısal tepkiler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yönetmeliklerde önerilen kareler toplamının karekökü (SRSS) yöntemine dayalı derz genişlikleri çarpışmayı büyük ölçüde önlese de mimari açıdan fazla geniş bulunmuştur. Ancak güçlü kolon–zayıf kiriş prensibi uygulandığında, derz genişliği SRSS'nin %50'sine kadar azaltılabilmiş ve plastik mafsallar sadece kirişlerle sınırlı kalmıştır. Bu durum, uygun tasarım koşullarında dar derzlerin yapısal güvenliği tehlikeye atmadan uygulanabileceğini göstermiştir. Bulguların genellenebilmesi için farklı yapı düzenlerinde ek çalışmalara ihtiyaç duyulduğu ifade edilmiştir.

Aggarwal ve Saha (2025), eğimli arazilerde inşa edilen bitişik betonarme yapıların farklı derz mesafeleri altındaki sismik davranışını, özellikle kat düzeyinde meydana gelen çarpışma etkisi açısından değerlendirmiştir. Çalışmada, tepe bölgelerinde yaygın olarak kullanılan iki yapı konfigürasyonu olan basamaklı geri çekilme tipi (stepback) ve bölünmüş temel tipi (split-foundation) yapılar, 4 ve 8 katlı olarak modellenmiş; aralarına temas elemanı yerleştirilerek çarpışma etkisi altında doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz edilmiştir. (Şekil 9). Analizler sonucunda, çarpışmanın 4 katlı yapılarda en fazla üst temel seviyesinin hemen üzerindeki katta, 8 katlı yapılarda ise 5. veya 6. katlarda maksimum göreceli kat öteleme oranı oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca, stepback tipi yapıların düşey ekseninde daha fazla dönme hareketi sergilediği, bunun daha büyük çatı ötelemelerine ve çarpışma kuvvetlerine yol açtığı saptanmıştır. Bu nedenle, stepback yapılar, split-foundation tipine kıyasla hem deplasmana hem de ivmeye duyarlı yapı elemanlarında daha fazla hasar riski taşıdığı görülmüştür. Normalize edilmiş kat ivmesi açısından, 4 katlı yapılarda en yüksek değer çatı katında, 8 katlı yapılarda ise 3. veya 4. katlarda gözlenmiştir. Sonuçlar, bu tip bitişik yapılarda çarpışma etkisinin yalnızca taşıyıcı sistemleri değil, ivmeye duyarlı yapı elemanlarını da ciddi şekilde etkilediğini; yapı tipi ve derz mesafesinin, hasar düzeyini belirlemede kritik rol oynadığını ortaya koymuştur.



Şekil 9. Aggarwal ve Saha (2025) tarafından dikkate alınan yapı konfigürasyonları

1.3.2. Deneysel Çalışmaları İçeren Literatür Araştırması

Papadrakakis ve Mouzakis (1995), iki bitişik betonarme yapı modelinin deprem sırasında çarpışma davranışını sarsma masası testleri ile incelemişlerdir. Çalışmada biri rijit, diğeri esnek olan iki yapı modeli kullanılmış ve çarpışmalı ile çarpışmasız durumlar karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, çarpışma nedeniyle esnek yapıdaki deplasmanların azaldığını, rijit yapıdaki ivmelerin ise belirgin şekilde arttığını göstermiştir. Çarpışma anlarında kısa süreli ancak yüksek ivme pikleri ve yerel deformasyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, çarpışma etkisinin yapılar arası enerji transferi yarattığı ve bu durumun yapısal tepkileri önemli ölçüde etkilediği ifade edilmiştir. Çalışmada elde edilen veriler, analitik modellerle karşılaştırılmış ve sonuçlar genel olarak birbiriyle uyumlu bulunmuştur.

Filiatrault vd. (1995), bitişik yapıların deprem sırasında çarpışma davranışını incelemek amacıyla, o dönemde yaygın olarak kullanılan SLAM-2 ve PC-ANSR yazılımlarının doğruluğunu test etmek ve farklı yapısal düzenlerin çarpışma üzerindeki etkilerini değerlendirmek üzere sarsma masası deneyleri gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, biri 3 katlı, diğeri 8 katlı olmak üzere iki adet tek açıklıklı 1/8 ölçekli bina modeli kullanmış ve deneyler 3.00×3.00 m boyutlarındaki bir sarsma masasında uygulamışlardır. Araştırmada, farklı boşluk mesafeleri, dört farklı yapısal düzen ve üç ayrı ivme yoğunluğu altında toplam

34 deney yapmışlardır. Sayısal modellerin deneysel verilerle karşılaştırılmasında, 1940 El Centro depremine ait ivme kaydını kullanmış ve bu kayıtları 0.15g ve 0.50g düzeylerinde ölçeklendirerek analizlere dâhil etmişlerdir. Ayrıca binalar arasındaki boşluk mesafesi, bitişik durumda, 15.0 mm açıklıkla ve çarpışmasız durum olarak üç farklı senaryo üzerinden değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar, çarpışma durumunda yüksek (8 katlı) binanın göreceli kat ötelemelerinin arttığını, buna karşılık daha kısa (3 katlı) binada ötelemelerin azaldığını göstermiştir. Çarpışmasız senaryoda, 8 katlı binada döşemelerin birbirine yaklaşmasıyla maksimum kat ivmesi 2.50g olarak ölçülmüştür. Ancak boşluğun yetersiz olduğu ve çarpışmanın gerçekleştiği koşullarda bu değer 12.00g'ye kadar çıkmıştır. En kritik durum ise döşeme ile kolonun çarpıştığı senaryoda gözlemlenmiş; bu durumda etkileşimin meydana geldiği katta ivme değeri 23.00g'ye ulaşmıştır. Bu bulgu doğrultusunda, döşeme-kolon çarpışmalarının yapısal açıdan çok daha tehlikeli olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar, deney sonuçlarının başlangıçta sayısal analizlerle önemli farklılıklar gösterdiğini, ancak modellerin kalibre edilmesi sonrasında deney verilerine daha yakın sonuçlar elde edildiğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle, çarpışma etkilerini simüle eden yazılımlarda model kalibrasyonunun kritik önem taşıdığını belirtmişlerdir.

Chau vd. (2003), Hong Kong Polytechnic Üniversitesi'nde bulunan 3.00×3.00m boyutlarındaki tek eksenli sarsma masasında farklı doğal frekans, sönüm oranlarına sahip ve aralarındaki deprem derzi mesafesi değişken olan iki bitişik yapının çarpışma davranışını hem deneysel hem de teorik olarak inceleyen kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deney numunesi olarak 2 metre yüksekliğindeki çelik kayma çerçeveleri kullanılmıştır. Bu çerçeveler farklı genlik ve frekanstaki sinüs dalgalarının yanı sıra, 1940 El Centro depremine ait ivme kayıtlarına da maruz bırakılmışlardır. Deneysel gözlemler, Chau ve Wei (2001) tarafından önerilen doğrusal olmayan çarpışma modeli ile karşılaştırılmıştır. 190'dan fazla yapılan test sonucunda çarpışmanın rijit yapıda meydana gelen ivme değerini arttırdığı buna karşılık esnek yapının tepkisini azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, iki yapı arasında çarpışmanın meydana gelmediği en büyük açıklık mesafesinin, uyarı frekansı esnek yapının doğal frekansına yaklaştığında ortaya çıktığı belirlenmiştir. Deneysel bulgular, Chau ve Wei'nin (2001) çarpışma modelinin çarpışma hızı ve mesafesi açısından niteliksel olarak güvenilir sonuçlar üretebildiğini göstermiştir.

Chau vd. (2004), sarsma masası üzerinde gerçekleştirdikleri çarpışma deneyleri (Şekil 10) ve analitik çalışmalar iki yapının çarpışma davranışına burulmanın etkisini incelemişlerdir. Farklı doğal frekanslarda yapılar oluşturmak amacıyla deneylerde kullanılan

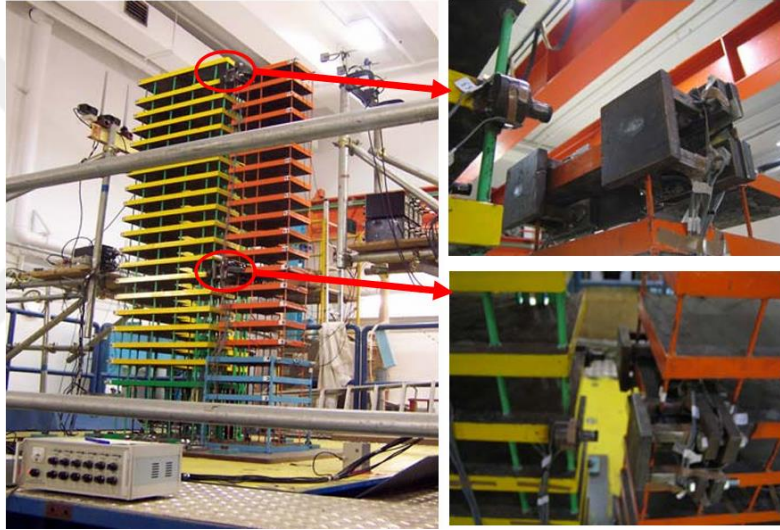
kayma çerçevelerinin üst plakalarına farklı kütleler eklenmiş ayrıca bu kütleler, yapıların kütle merkezleri ile rijitlik merkezleri çakıştırılmayarak asimetrik yapı davranışı sağlanacak şekilde konumlandırılmışlardır. Farklı kütle yerleşimleri ve sinüzoidal yer hareketleri kullanılarak beş farklı durum test edilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen veriler hafif yapıların, çarpışma sırasında enerji transferine daha fazla maruz kaldığından, çarpışma tepkilerine karşı daha hassas davranış sergilediğini, dönme ve burulma gibi yapısal tepkilerin burulma özelliği bulunan binalarda arttığını, özellikle asimetrik yapıların burulmalı çarpışma etkileri açısından ciddi dinamik sorunlar yaratabileceğini ortaya koymuştur.



Şekil 10. Chau vd. (2004) tarafından gerçekleştirilen deneye ait görsel

Chau vd. (2006) burulmalı çarpışma etkilerini daha gerçekçi koşullarda incelemek amacıyla, Hong Kong'da yer alan asimetrik, 21 katlı iki yapının 1:45 ölçekli modelleriyle (Şekil 11) sarsma masası deneylerini içeren çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. Bu yapılardan biri daha rijit ve düzensiz plana), diğer bina ise daha esnek ve düzenli plana sahiptir. Binalar arasında yaklaşık 25 mm açıklık bulunduğu ve dinamik özellikleri farklı olduğu için, deprem sırasında yapılar arasında faz farkı oluşarak burulmalı çarpışmaların meydana gelmesi muhtemel kabul edilmiştir. Deneylerde farklı frekans, ivme ve açıklık mesafeleri kullanılarak yüzlerce test gerçekleştirilmiş, başlangıç hareketi olarak sinüs dalgalarının yanı sıra 1940 El Centro, 1989 Loma Prieta ve 1994 Northridge depremlerinin ivme kayıtlarını da kullanmışlardır. Yapılar arasında doğrusal olmayan ve burulmalı çarpışma etkilerinin

incelenebilmesi amacıyla, çarpışma elemanlarını hem üst kat hem de orta kat seviyelerine yerleştirmiş, çarpışma kuvvetlerinin ölçülmesi için bu elemanlara gerinim ölçerler monte etmişlerdir. Özellikle yüksek katlı yapılarda üst mod etkilerinin önemi nedeniyle, orta kat seviyesinde de çarpışma meydana gelebileceği öngörmüşlerdir. Binalar arasında belli bir açıklık mesafesi varken çarpışmaların üst kat seviyelerinde gerçekleştiğini, sıfır açıklık durumunda hem üst hem orta kat seviyelerinde gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, çarpışmalar sırasında daha ağır yapıdan hafif yapıya aktarılan enerjinin, hafif yapının kendi başına maruz kalmayacağı düzeyde dinamik tepkiler göstermesine neden olduğunu görmüşlerdir. Bu nedenle, mevcut yapıların yanına yeni yapı inşa edilirken çarpışma etkisinin mutlaka dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.



Şekil 11. Hong Kong’da bulunan gerçek iki yapının sarsma masası deneyleri için ölçeklendirilmiş modelleri ve deney düzeneği (Chau vd.,2006)

Rezavandi ve Moghamad (2007), iki boyutlu, tek açıklıklı ve küçük ölçekli yapı modelleri üzerinde yürüttükleri analitik ve deneysel çalışmalarında, döşeme-döşeme çarpışma türü üzerinde durmuşlardır. Çalışmada, yapılar arası çarpışmanın etkilerini en aza indirmek amacıyla farklı deprem derzi açıklıkları, bağlantı elemanları ve çarpışma bölgelerinde sönümleyici malzemeler kullanılmışlardır. Deneysel analizlerde hem harmonik yüklemeler hem de geçmişte meydana gelmiş bazı gerçek deprem kayıtlarını uygulamış; ancak yapıların zarar görmemesi için bu kayıtları yaklaşık %60 oranında azaltılmışlardır. Gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde, kat seviyelerindeki ivme ve yer değiştirme değerlerindeki değişimleri gözlemlemiş ve bu bulguları analitik modelleme sonuçlarıyla

karşılaştırmışlardır. Elde edilen veriler, çarpışma etkilerinin büyüklüğünde yer hareketinin frekans içeriğinin belirleyici bir unsur olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, yapıların üst katlardan birbirine bağlanmasının ve çarpışma noktalarına sönümleyici eleman yerleştirilmesinin hem ivme hem de deplasman değerlerinde kayda değer bir azalma sağladığı belirlenmiştir.

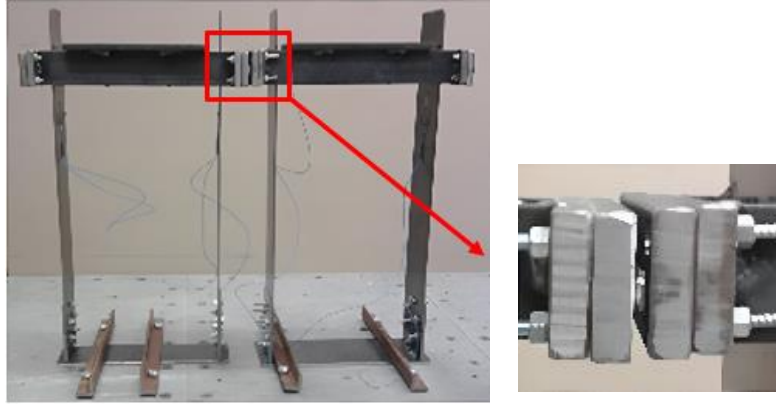
Jankowski (2010), literatürde farklı yapı malzemelerinden üretilmiş elemanlar arasındaki deprem kaynaklı çarpışma davranışlarını karşılaştıran deneysel bir çalışmanın bulunmadığını ve ayrıca çarpışma sırasında oluşan enerji kayıplarını hesaba katmak amacıyla sayısal modellerde kullanılan çarpışma katsayısının uygun değeri konusunda belirsizlikler olduğunu tespit etmiştir. Bu doğrultuda yürüttüğü çalışmada hem farklı malzemeler için çarpışma katsayısının deneysel olarak belirlenmesi hem de bu malzemelere sahip yapı elemanları arasında meydana gelen çarpışma etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla iki aşamalı deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir (Şekil 12). İlk aşamada çelik, beton, ahşap ve seramikten üretilmiş küreleri farklı yüksekliklerden rijit bir yüzeye bırakarak çarpışma katsayısı (e) değerlerini hesaplamıştır. Sonuçlar, e katsayısının kürelerin kütlesine bağlı olmadığını ancak çarpışma öncesi hıza oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. En yüksek e değeri seramik kürelerde, en düşük değer ise ahşap kürelerde gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm malzemelerde, çarpışma öncesi hız arttıkça e katsayısında belirgin bir azalma eğilimi saptanmıştır. İkinci aşamada, sarsma masasını kullanarak farklı yapı malzemelerinden üretilmiş binalar arasındaki çarpışmalar sonucu ortaya çıkan yapısal tepkilerin karşılaştırılmasına odaklanan bir deney gerçekleştirmiştir. Deney için farklı rijitlik ve kütle özelliklerine sahip iki adet, küçük ölçekli kayma çerçevesi modeli kullanmıştır. Sarsma masasında gerçekleştirdiği deneyler sonucunda sayısal analizlerle uyumlu olarak, çarpışmanın bazı durumlarda titreşim genliğini artırdığı, bazı durumlarda ise sönümleyici etki göstererek azaltabildiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, çarpışan yapılarda kullanılan malzemenin, deprem sırasında yapı davranışını önemli ölçüde etkilediğini vurgulamıştır. En yüksek yer değiştirme artışının çelik-çelik çarpışmalarında, en düşük yer değiştirmenin ise ahşap-ahşap çarpışmalarında gerçekleştiğini tespit etmiştir. Bu çalışmada elde ettiği diğer bir sonuç, çarpışmanın özellikle daha hafif ve esnek yapı üzerinde titreşim genliğini artırdığı yönündedir. Ancak literatürde yer alan Papadrakakis ve Mouzakis (1995) ile Chau vd. (2003) çalışmalarında, çarpışma sonrası daha rijit yapının tepkisinin arttığı, buna karşılık esnek yapının tepkisinin azaldığı rapor edilmiştir. Bu farklılığın temel nedeni olarak, Jankowski (2010) çalışmada kullanılan rijit yapının kütlesinin, esnek yapıya göre yaklaşık

iki kat daha fazla olmasını göstermiştir. Bu durum, yapıların çarpışma sırasında gösterdiği tepkilerdeki farkın, sadece rijitlik değil, kütle oranlarıyla da doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 12. Jankowski'nin (2010) gerçekleştirdiği serbest düşme ve sarsma masası deneylerine ait düzenekleri

Khawwaja ve Chouh (2013), sıralı binalar arasındaki çarpışma davranışını deneysel olarak incelemek amacıyla, sarsma masası üzerinde küçük ölçekli modeller kullanarak deneyler gerçekleştirmiştir. (Şekil 13). Çalışmada, farklı kütle ve rijitlik özelliklerine sahip bina modelleri ile sekiz farklı yapı düzeni oluşturulmuş; bu düzenlerin çarpışma etkileri, binalar arasında hiçbir deprem derzi bırakılmadan, beş farklı deprem kaydı altında incelenmiştir. Elde edilen deneysel bulgular, rijit yapıların, sadece iki bina arasında gerçekleşen çarpışmalara kıyasla, sıralı yapı sistemlerindeki çarpışmalardan daha fazla etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca, literatürdeki bazı bulguların aksine, rijit bir yapının sıralı sistemde ortada yer almasının yapı tepkisini azaltmadığı, çarpışma kaynaklı hasar düzeyinin yapının konumuna değil, yalnızca doğal periyoduna bağlı olduğu tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde, aynı yüksekliğe sahip sıralı yapı dizilimlerinde, ortada bulunan yapının çarpışma etkisinden daha az etkilenmediği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, deneyler sırasında çarpışmanın dikkate alınmadığı bazı durumlarda maksimum yer değiştirmeye neden olan yer hareketinin, çarpışma etkisi hesaba katıldığında daha düşük yapı tepkileriyle sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bu durumun, yüksek yer değiştirme üreten yer hareketlerinin daha yüksek çarpışma hızları doğurmasına, bu hızların da daha fazla enerji tüketimine yol açarak yapının tepkisini azaltmasına bağlı olduğu ifade edilmiştir.

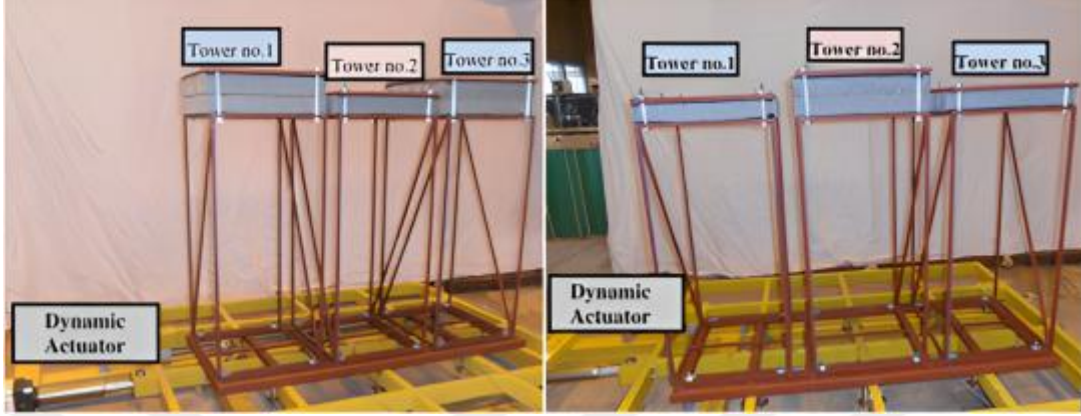


Şekil 13. Khatiwada ve Chouw (2013) tarafından oluşturulan deney düzeneği

Khatiwada vd. (2013), gerçekleştirdikleri deneylerde beş farklı yer hareketi kullanarak elde ettikleri deplasman verileri aracılığıyla, literatürde yer alan analitik çarpışma modellerinde ihtiyaç duyulan temas elemanı rijitliği ve doğrulama katsayılarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu veriler, hangi temas modeliyle yapılan hesaplamaların deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu ortaya koymak amacıyla kullanılmıştır. Çalışmanın analitik bölümünde; sırasıyla lineer viskoelastik yay modeli, geliştirilmiş lineer viskoelastik yay modeli, lineer olmayan viskoelastik model, Hertz modeli ve geliştirilmiş Hertz modeli olmak üzere beş farklı çarpışma modelini değerlendirmişlerdir. Temas eleman rijitlikleri ve doğrulama katsayıları, ayrıca yapılan sarkaç deneyleri ile hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, Hertz modeli hem deneysel verilere hem de diğer modellere kıyasla daha yüksek deplasman değerleri üretmiştir. Buna karşılık, diğer dört modelin sonuçlarının birbirine yakın olduğu ve deneysel verilere iyi uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Bu kapsamda yazarlar, uygulama kolaylığı ve güvenilir sonuçlar üretmesi nedeniyle lineer viskoelastik yay modelinin analitik çalışmalarda tercih edilmesinin uygun olacağını belirtmişlerdir.

El-Khoriby vd. (2015) 2.00×2.00m boyutlarındaki tek eksenli sarsma masasında gerçekleştirdikleri deneylerde, ikiden fazla bitişik nizam olan yapının çarpışma sonucunda gösterdikleri davranışı deneysel ve sayısal analizlerle incelemişlerdir (Şekil 14). Yapılan çalışmanın sonucunda sıralı binalar arasındaki çarpışma durumunda rijit binaların esnek binalara kıyasla çarpışmadan daha fazla etkilendiğini; esnek binaların rijit binaların hareketlerini sınırladığı için bu durumdan daha az etkilendiğini, binalar arasındaki derz mesafesinin arttırılmasının farklı depremler altında yapısal tepkiyi arttırabileceği gibi

azaltılabileceğini, binalar arasındaki optimum mesafenin ya çarpışmayı önleyecek kadar büyük olması ya da tamamen boşluksuz olması gerektiğini belirtmişlerdir.

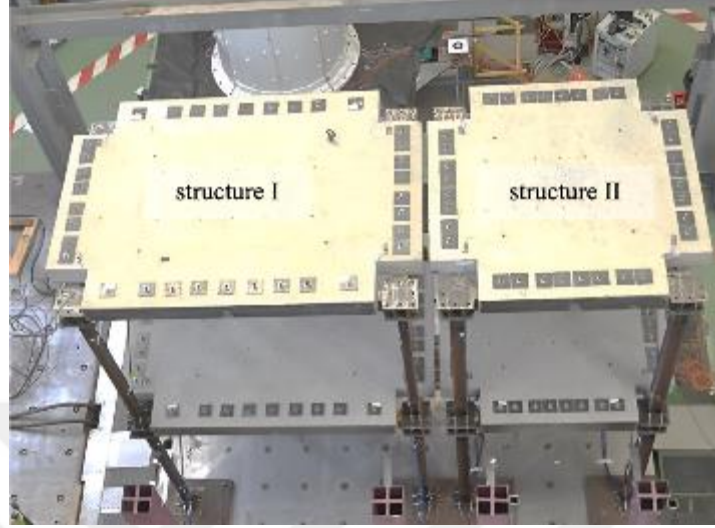


Şekil 14. El-Khoriby vd. (2015) tarafından oluşturulan deney düzeneği

Soltysik vd. (2017), gerçekleştirdikleri küçük ölçekli sarsma masası deneyleriyle, bitişik binalar arasında oluşan çarpışma etkilerini azaltmak amacıyla etkileşim bölgelerine polimer esaslı malzemeler yerleştirmişlerdir. Bu kapsamda, 3 farklı çelik çerçeve modeli ile 4 farklı kalınlıkta polimer malzeme kullanılmıştır. Deney sonuçları, polimer malzeme kalınlığı arttıkça çarpışma etkilerinin belirgin şekilde azaldığını; en düşük yapısal tepkilerin ise aradaki boşluğun tamamen polimer malzeme ile doldurulması durumunda elde edildiğini göstermiştir.

Crozet vd. (2019), sarsma masası deneyleri ile farklı rijitlik özelliklerine sahip, her biri iki katlı olan bina modelleri kullanarak çarpışma etkileri araştırmıştır (Şekil 15). Yapılar arasındaki boşluk mesafeleri değiştirilerek çeşitli yer hareketleri uygulanmış, ayrıca bazı konfigürasyonlarda kat seviyelerinde rijit bağ elemanları eklenerek çarpışmanın önlenip önlenemeyeceğini değerlendirmişlerdir. Deneysel veriler sonucunda, çarpışma etkisinin özellikle rijit yapının üst katlarında ivme ve kat ötelemelerini belirgin şekilde artırdığını, buna karşılık, esnek yapıdaki etkilerin daha sınırlı düzeyde kaldığını gözlemlemişlerdir. Çarpışma anlarında yalnızca ivme büyüklüğü değil, aynı zamanda ileri modların tetiklendiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, yapıların katlarını birbirine bağlayan rijit elemanların, özellikle rijit yapılarda çarpışmanın olmadığı senaryolarda yer değiştirmeleri artırabildiği ancak çarpışma yaşanan senaryolarla karşılaştırıldığında bu bağlantı elemanlarının esnek yapıdaki ötelemeleri azalttığı ve rijit yapıda önemli bir artışa sebep

olmadığını tespit etmişlerdir. Dolayısıyla bu elemanların çarpışmayı önlemede etkili olabileceğini vurgulamışlardır.



Şekil 15. Crozet vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen deneylere ait görsel

Jiang vd. (2022), bitişik çok katlı yapılar arasında meydana gelen deprem kaynaklı çarpışma etkilerini araştırmak üzere deneyler gerçekleştirmiştir. Deneylerde, çelik taşıyıcı sisteme sahip iki katlı ve üç katlı üç yapı modelinin 1/3 ölçekli prototiplerini kullanmışlardır. Bu modeller üzerinde, özellikle üç farklı çarpışma türü olan döşeme-döşeme, döşeme-kolon ve eksantrik çarpışmaları deneysel olarak ele almışlardır. Çalışmada çarpışma içeren ve içermeyen durumlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş; çarpışmanın, yapıların dinamik tepkisinde yüksek frekans bileşenlerini belirgin şekilde artırdığını gözlemlemişlerdir. Özellikle döşeme-döşeme çarpışmaları, döşeme ile kolon arasındaki çarpışmalara göre daha büyük darbe kuvvetleri üretmiş ve kat ivmeleri açısından daha kritik sonuçlar doğurmuştur. Bunun yanı sıra, eksantrik çarpışma senaryolarında yapılar üzerinde oluşan taban kesme kuvvetleri ve yer değiştirme taleplerinde anlamlı değişiklikler meydana geldiği rapor etmişlerdir.

Miari ve Jankowski (2022a), bitişik yapıların deprem sırasında sergilediği davranışta zemin türünün etkisini değerlendirmek amacıyla sarsma masası testleri gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, farklı dinamik özelliklere sahip iki adet küçük ölçekli tek katlı çelik yapı modeli kullanmış ve aralarındaki derz mesafeleri değiştirilerek çarpışma etkilerini incelenmişlerdir (Şekil 16). Sonuçlar, çarpışmanın yapıların özellikle ivme tepkilerini önemli ölçüde artırdığını ve bu etkinin esnek yapı üzerinde daha belirgin olduğunu

göstermiştir. Çalışma, zemin türünün yapıların çarpışma sırasındaki davranışları üzerinde kritik bir etkisi olduğunu ve bu etkinin çarpışma gerçekleştiğinde daha da belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur.



Şekil 16. Miari vd. (2022)'nin çarpışma deneyleri için geliştirdiği deney düzeneği

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde, bitişik binalar arasındaki çarpışma etkisinin çoğunlukla sayısal modellere dayalı yöntemlerle incelendiği, sınırlı sayıda deneysel çalışmanın ise genellikle küçük ölçekli çelik çerçeve sistemlerle yapıldığı görülmektedir. Bu durum, betonarme yapıların çarpışma altındaki davranışlarının deneysel olarak yeterince araştırılmadığını göstermektedir. Sunca (2023), 1/2 ölçekli 5 adet betonarme deney numunesi ile sarsma masası deneyleri gerçekleştirmiştir (Şekil 17). Deneyler sırasında 1992 Erzincan ve 2004 Parkfield depremine ait ölçeklendirilmiş ivme kayıtları artımlı olarak sarsma masasına uygulanmıştır. Çalışmasında 3 farklı çarpışma senaryosunu göz önünde bulundurmuştur: (i) aynı yüksekliğe sahip binaların çarpışması, (ii) kat yükseklikleri farklı binaların çarpışması, (iii) farklı yüksekliğe sahip binaların çarpışması. Ayrıca çarpışma etkilerinin azaltılması amacıyla kauçuk sönümleyicileri de incelemiştir. Deneyler sırasında ivme ve yer değiştirme tepkilerinde meydana gelen değişimlerin yanı sıra dinamik karakteristiklerin çarpışma etkilerinden ne ölçüde değiştiğini de deneysel olarak incelemiştir. Sarsma masası deneyleri sonucunda, çarpışma etkisiyle ivme tepkilerinde ani ve yüksek genlikli piklerin meydana geldiğini; özellikle aynı kat hizasında gerçekleşen döşeme-döşeme çarpışmalarının yapısal tepkileri belirgin biçimde büyüttüğünü gözlemlemiştir. Göreli kat ötelemeleri ve taban kesme kuvvetlerinde de

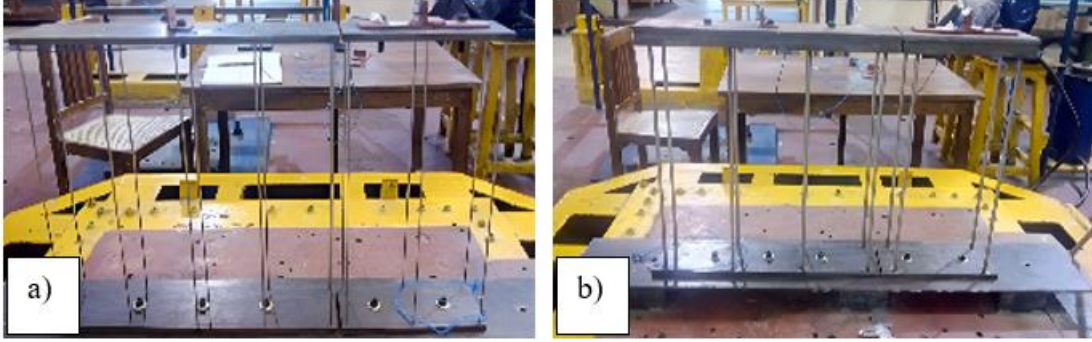
Çarpışmaya bağlı olarak ciddi artışlar tespit edilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan kauçuk sönümleyici elemanların, çarpışma kaynaklı ivme artışlarını azaltmada etkili olduğunu belirlemiştir.



şekil 17. Sunca (2023) tarafından gerçekleştirilen sarsma masası deneylerine ait görseller

Hubballı ve Jangid (2024), genleşme derzine sahip uzun yapı sistemlerinde bitişik yapıların deprem etkisi altındaki çarpışma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir (şekil 18). Tek katlı ve farklı uzunluktaki  elik  er eve modeller üzerinde dört ayrı deney grubu uygulanmıştır: (i) benzer doğal frekansa sahip esnek modeller, (ii) rijit modeller, (iii) farklı frekansa sahip esnek-rijit model kombinasyonları ve (iv) aynı döşeme kütlesine sahip ama farklı doğal frekansa sahip modeller. Deneyler, 3 mm ve 5 mm genişlikte genleşme boşlukları bırakılarak gerçekleştirilmiş; çarpışma azaltıcı  nlem olarak neopren kauçuk ped kullanmışlardır. Elde edilen bulgular ışığında, yakın frekanslı modeller arasında çarpışma etkilerinin daha az olduğunu ve sönümleyici malzeme uygulamasının etkili olduğunu, buna karşın, farklı frekansa sahip modeller arasında hem çarpışma sıklığının hem de ivme büyüklüğünün arttığını; neopren pedlerin bu kombinasyonlarda istenilen azaltıcı etkiyi sağlamadığını ifade etmişlerdir. Aynı döşeme kütlesine sahip modellerin analizlerinde ise her iki yapının da çarpışmadan önemli ölçüde etkilendiğini, özellikle kısa rijit yapıların büyük ivmelere maruz kaldığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, özellikle yakın doğal frekanslara sahip yapıların yan yana yerleştirilmesinin çarpışma riskini azaltabileceğini ve

genleşme derzine yerleştirilecek uygun malzemelerle yapısal tepkilerin hafifletilebileceğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 18. Hubballi ve Jangid (2024) tarafından esnek ve rijit modeller için oluşturulan deney düzeneği

1.4. Tezin Amacı ve İçeriği

Bu tez çalışması kapsamında, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar görmüş mevcut bir betonarme binanın sismik davranışı ve hasarları doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile incelenmiştir. İnceleme konusu bina, çevre duvarı ile arasında yeterli boşluk bulunmaması nedeniyle çarpışma hasarlarına maruz kalmıştır. Çalışma kapsamında yapının mevcut durumu dışında dört farklı çarpışma senaryosu da dikkate alınmıştır. Dikkate alınan senaryolar aşağıdaki gibidir:

- (i) Çarpışmanın olmadığı durum (Çarpışmasız durum)
- (ii) Binanın bir köşesinde kolon ve duvar çarpışması (Durum-1)
- (iii) Binanın iki köşesinde birden kolon ve duvar çarpışması (Durum-2)
- (iv) Binanın bir köşesinde döşeme ve duvar çarpışması (Durum-3)
- (v) Binanın iki köşesinde birden döşeme ve duvar çarpışması (Durum-4)

Durum-1, 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında yapının mevcut durumunu temsil etmektedir. Diğer senaryolar ise, olası çarpışma durumlarının yapısal tepkiler üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla ele alınmıştır.

Çalışma kapsamında binanın sonlu eleman modelinin oluşturulması ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri için SAP2000 programı kullanılmıştır. Sonlu eleman modeli oluşturulurken malzemedeki doğrusal olmayan davranışı temsil etmek amacıyla 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği esaslarında sunulan beton modeli ve donatı çeliği

modeli kullanılmıştır. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sırasında ivme kaydı olarak 2023 Kahramanmaraş depremlerinde kaydedilmiş gerçek ivme kayıtları kullanılmıştır. Bu ivme kayıtlarının seçiminde istasyonun binaya olan uzaklığı, zemin sınıfı, kayma dalgası hızları gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. Ayrıca TBDY-2018'e göre dinamik enerji kaybı viskoz sönüm matrisiyle temsil edilmiş olup, viskoz sönüm matrisi Rayleigh orantılı sönüm matrisi olarak oluşturulmuştur. Analizlerde, sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmış ve geometrik nonlineerlik ($P-\Delta$) etkileri göz önüne bulundurulmuştur. Bina ve çevre duvar arasında meydana gelen çarpışma, literatürde sıkça kullanılan lineer olmayan elastik yay (Hertz modeli) çarpışma modeli ile temsil edilmiştir.

Analiz süreci, ilk olarak çarpışmasız model ile başlatılmış; bu modelde yapının göreceli kat ötelemeleri, kat ivmeleri ve taban kesme kuvvetleri gibi yapısal tepkileri belirlenmiştir. Ardından çarpışma etkilerini içeren diğer senaryolara ilişkin doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, çarpışma etkilerinin yapısal tepkiler üzerindeki artış miktarı ve potansiyel hasar düzeyleri ortaya konmuştur. Elde edilen veriler sahada gözlemlenen hasarlar ile kıyaslanarak çarpışma etkilerinin yapısal davranış ve hasarlar üzerine olan etkileri ortaya konulmuştur.

1.5. Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz, yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarını en gerçekçi biçimde değerlendirmeye olanak tanıyan bir hesaplama yöntemidir. Bu yöntemde, deprem etkisi altındaki taşıyıcı sistemin hareketini tanımlayan diferansiyel denklemler, zamana bağlı olarak adım adım sayısal integrasyon ile çözülür. Analiz süresince, doğrusal olmayan etkiler sebebiyle sistemin rijitlik matrisinin zamanla değiştiği kabul edilir (TBDY, 2018).

Bu analiz yöntemi ile, yapıların hem malzeme hem de geometrik nonlineerlikleri dikkate alınarak, yapıdaki plastik mafsall oluşumu, rijitlik kaybı, yer değiştirmeler, kat ötelemeleri, iç kuvvetler vb. dinamik olarak takip edilebilir. Bu sayede yapıların elastik sınırlar ötesindeki davranışları, performans seviyeleri ve hasar mekanizmaları değerlendirilir. Yapılar arası çarpışma gibi ani ve yüksek enerjili etkileşimlerin zaman içerisindeki değişimi ve bu etkileşimin yapısal davranış üzerindeki yansımaları zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerle gerçekçi şekilde ortaya konur.

Bu tez çalışmasında, hem depreme maruz kalmış gerçek bir yapının hem de yapıdaki çarpışma kaynaklı yapısal tepkilerin incelenecek olması nedeniyle analiz yöntemi olarak zamanı tanım alanında doğrusal olmayan analiz seçilmiştir.

1.6. Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Davranış Modellerinin İdealleştirilmesi

TBDY-2018'e göre doğrusal olmayan davranış iki şekilde temsil edilebilir: (i) Yıgılı plastik davranış modeli, (ii) Yayılı plastik davranış modeli.

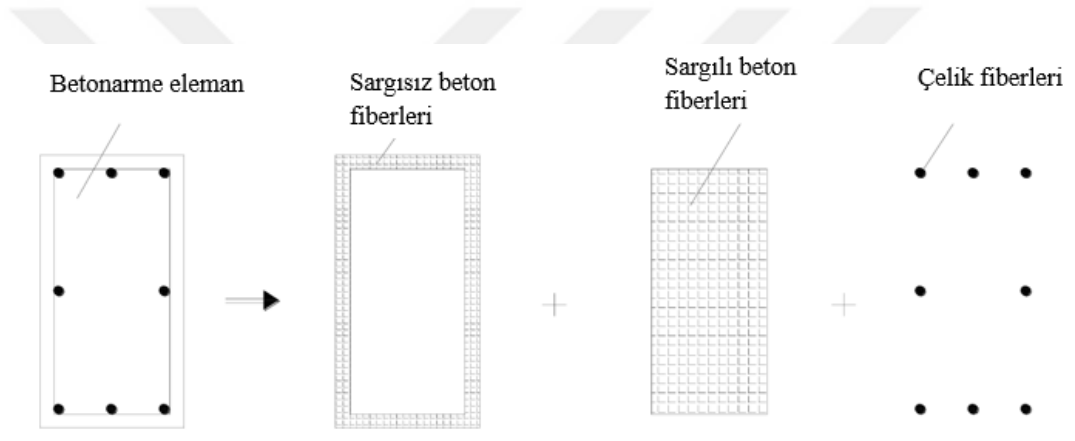
Yıgılı plastik davranış modeli, iç kuvvetlerin plastik kapasiteye ulaştığı sınırlı uzunluktaki bölgelerde, plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı şekilde dağıldığını kabul eder. Bu bölgeler plastik mafsallık olarak adlandırılırken, bölgenin uzunluğu (plastik mafsallık boyu) çalışan doğrultudaki kesitin boyunun yarısı alınır. (TBDY,2018).

TBDY-2018'de yıgılı plastik davranış modelinin kullanılmasına ilişkin verilen esaslar şu şekildedir:

- Çerçeve (çubuk) sonlu elemanları olarak modellenen kolon, kiriş ve 4.5.3.8'de verilen geometrik koşulu sağlayan betonarme perdelerde, doğrusal olmayan davranış modeli olarak Yıgılı Plastik Davranış (Plastik Mafsallık) Modeli kullanılabilir.
- Kolon ve kirişlerde *plastik mafsallık*, kolon-kiriş birleşim bölgesinin hemen dışına, diğer deyişle kolon veya kirişlerin net açıklıklarının uçlarına konulabilir. Ancak, düşey yüklerin etkisinden ötürü kiriş açıklıklarında da plastik mafsallıklar oluşabileceği göz önüne alınmalıdır.
- Betonarme ve çelik kesitlerin iki doğrulu iç kuvvet-plastik şekil değiştirme bağıntılarında pekleşme etkisi (plastik dönme artışına bağlı olarak plastik momentin artışı) terk edilebilir.
- Enkesit şekli dikdörtgen, I, T, L, U veya C olan perdeler, plandaki en büyük perde kolu uzunluğunun toplam perde yüksekliğine oranının $1/2$ 'yi aşmadığı durumlarda, ekseni enkesit ağırlık merkezinden geçen eşdeğer çubuk sonlu eleman olarak modellenenirler. Bu durumda doğrusal olmayan davranışın temsili için yıgılı plastik davranış modeli tercih edilebilir.

- Sadece eksenel kuvvet altında plastik şekil değiştirme yapan elemanların plastik şekil değiştirme bölgelerinin uzunluğu, ilgili elemanın serbest boyuna eşit alınacaktır.

Yayıllı plastik davranış modeli, plastik şekil değiştirmelerin yapı elemanı boyunca sürekli olarak meydana geldiğini varsayar. Bu modelde, taşıyıcı elemanların enkesitleri, çekirdek beton, örtü betonu ve donatıların davranışlarının birbirinden bağımsız olarak izlenmesine olanak tanıyan fiber (lif) elemanlara bölünmüştür (Şekil 19). Bu modelleme yaklaşımı hem kesit içinde hem de eleman boyunca doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasına imkân sağlayarak, yapısal bileşenlerin mekanik davranışının daha ayrıntılı ve gerçekçi bir şekilde temsil edilmesini mümkün kılar (Yön ve Calayır, 2013).



Şekil 19. Betonarme bir taşıyıcı elemanın kesitinde doğrusal olmayan davranışın sürekli olarak dağıldığı tipik bir kesit lif modeli (Yön & Calayır, 2013)

TBDY-2018’de yayıllı plastik davranış modelinin kullanılmasına ilişkin verilen esaslar şu şekildedir:

- Binanın taşıyıcı sistemini oluşturan kolon, kiriş ve betonarme perdelerde doğrusal olmayan davranış modeli olarak *yayıllı plastik davranış modelleri* de kullanılabilir.
- Yayıllı plastik davranış modelleri, sonlu uzunluktaki uç bölgeleri (plastik şekil değiştirme bölgeleri) veya elemanın tüm uzunluğu boyunca doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri sürekli (yayıllı) biçimde göz önüne almak üzere kullanılabilir (TBDY-2018).
- Kesit içinde betonun veya yapısal çeliğin yeteri kadar küçük hücrelerle, çelik donatı çubuklarının ise tekil olarak modellendiği ve her bir hücrede doğrusal

olmayan eksenel gerilme birim şekil değiştirme bağıntılarının çevrimsel olarak göz önüne alınabildiği kesit hücresi (lif) modeli, uygulamada özellikle betonarme perdelerin doğrusal olmayan modellemesi için kullanılabilir. Bu modelle, karmaşık kesitli (T, L, U veya C şeklinde) betonarme perdelerde planda enkesit çeşitli bölgelere ayrılabilir, düşey doğrultuda da perde boyunca sonlu uzunlukta parçalar göz önüne alınarak her bir perde kolunda iki boyutlu bir sonlu eleman ağı oluşturulabilir.

- Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile deprem hesabının yapılması durumunda ve TBDY-2018 Bölüm 13'te belirtilen yüksek binalardaki boşluksuz ve boşluklu perdeler için yayılı plastik davranış modeli kullanılır.
- Deprem hesabının madde 5.7'ye göre zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile yapılması durumunda ve Bölüm 13 kapsamındaki yüksek binalarda boşluksuz ve bağ kirişli (boşluklu) perde parçaları için plastik mafsallık modeli kullanılmayacaktır. Bu elemanlar için 5.3.2'de tanımlanan kesit hücresi (lif) modelinin kullanılması zorunludur.

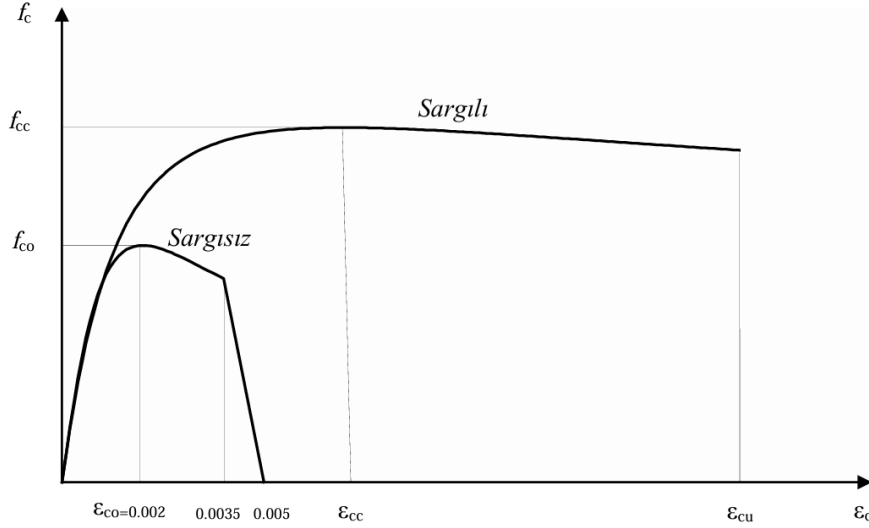
1.7. Betonarme Malzeme Modeli

Betonarme, gevrek davranış gösteren beton ile sünek özellikteki çelik donatının birlikte kullanılmasıyla elde edilen bir kompozit yapı malzemesidir. Basınca karşı yüksek dayanım gösteren beton çekme etkilerine karşı zayıf kalmaktadır. Bu nedenle, çekme dayanımı yüksek olan çelik donatılarla birlikte kullanılarak yapısal performans artırılır.

1.7.1. Sargılı ve Sargısız Beton Modelleri

Betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisi, birçok değişkenden etkilenmesi nedeniyle sabit bir eğriyle ifade edilemez. Ancak problemlerin çözülebilmesi ve betonun mekanik tepkisinin doğru anlaşılabilmesi için, bu ilişkiyi temsil eden uygun malzeme modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, literatürde farklı araştırmacılar tarafından çeşitli beton gerilme-şekil değiştirme modelleri geliştirilmiş ve önerilmiştir. TBDY-2018 ise doğrusal olmayan malzeme davranışını analizlerde temsil edebilmek için Ek 5A.1'de verilen beton modeli kullanılmasını önermiştir. Şekil 20'de TBDY-2018 Ek 5A.1'de verilen beton

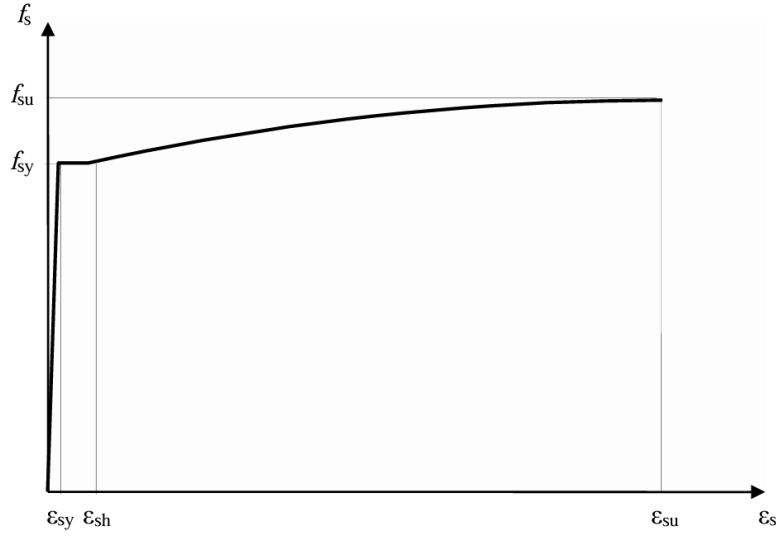
modeline ait sargısız ve sargılı beton için verilen gerilme-şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir.



Şekil 20. TBDY-2018’de önerilen beton gerilme-şekil değiştirme eğrisi

1.7.2. Donatı Çeliği Modeli

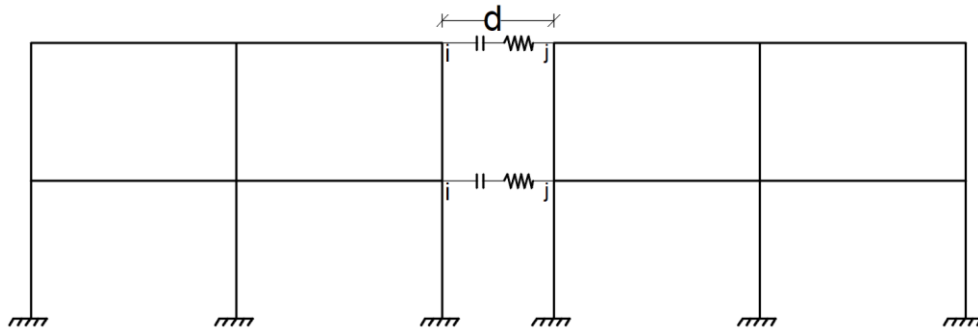
Beton çekmeye karşı zayıf olduğundan çekme gerilmelerini karşılamak için donatı çeliği kullanılır. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi çekme deneyleriyle elde edilir. Bu eğri, çeliğin davranışını üç temel aşamada tanımlar. İlk aşamada, çelik doğrusal elastik davranış gösterir; bu bölgede gerilme ile birim şekil değiştirme arasında orantılı bir ilişki vardır. Malzeme akma gerilimine eriştiğinde, ikinci aşama olan akma sahanlığı bölgesi başlar. Bu bölgede gerilme sabit kalırken şekil değiştirme artmaya devam eder. Akma sahanlığının ardından, pekleşme bölgesi olarak adlandırılan üçüncü aşamada, malzeme daha fazla gerilme taşıyabilme kapasitesine ulaşır. Bu aşamada gerilme yeniden artar ve sonunda çelik, kesitinde daralma (necking) sonucu kopar. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan, çeliğin absorbe edebildiği enerjiyi ifade eder ve bu enerji özellikle deprem gibi darbe etkili yüklemelerde büyük önem taşır (Ersoy vd., 2019). Bu nedenle, yüksek süneklik ve enerji sönümleme kapasitesi gerektiren yapılarda çeliğin bu özellikleri dikkate alınarak malzeme seçimi yapılmalıdır. Şekil 21’de TBDY-2018 Ek 5A.2’de donatı için verilen gerilme-şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir.



Şekil 21. TBKY-2018’de önerilen donatı çeliğinin gerilme-şekil değıştirme eğrisi

1.8. Lineer Olmayan Elastik Yay (Hertz Modeli) Çarpışma Elemanı

Bitişik yapılar arasındaki çarpışma davranışını temsil etmek için sonlu eleman modellerinde çeşitli çarpışma elemanları kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çarpışma etkisini simüle etmek amacıyla Şekil 22’de gösterilen Hertz modeli olarak bilinen doğrusal olmayan elastik yay modeli kullanılmıştır.



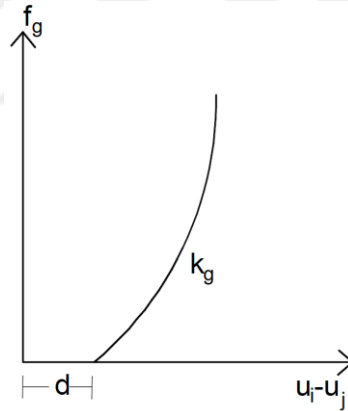
Şekil 22. Binalar arasındaki çarpışma

Bu modelleme yaklaşımı, yapılar arasındaki dinamik etkileşimi yalnızca temas anında devreye giren boşluk (gap) elemanları aracılığıyla simüle eder. Yapılar arasındaki boşluk kapandığında yay devreye girer ve kuvvet aktarımı gerçekleşir. Boşluk elemanının kuvvet–

şekil değiştirme ilişkisi aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir (Muthukumar ve DesRoches, 2006)

$$f_G(t) = \begin{cases} k_g [u(t) - d]^{3/2}, & u(t) > d \\ 0, & u(t) \leq d \end{cases} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde k_g boşluk elemanının doğrusal olmayan yay rijitliğini ifade eder. Bu katsayı, Jankowski (2005) tarafından yapılan sayısal benzetimlere dayanarak beton–beton çarpışmaları için $1.13 \times 10^9 \text{ N/m}^{3/2}$ olarak alınmıştır. $u(t)$, $(u(t)_i - u(t)_j)$ şeklinde tanımlanır, d yapılar arasındaki başlangıç boşluğunu temsil eder. $u(t)_i$ ve $u(t)_j$, bitişik yapıların deprem yönündeki yer değiştirmelerini gösterir. $u(t) > d$ olduğu durumda yapılar arasında çarpışma gerçekleşirken, $u(t) \leq d$ ise yapılar arasında çarpışma olmamaktadır. Hertz modelinde yer değiştirme ile çarpışma kuvveti arasındaki ilişki Şekil 23’te gösterilmiştir.



Şekil 23. Hertz yay modelinde çarpışma kuvveti–yer değiştirme ilişkisi (Muthukumar ve DesRoches, 2006)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Bu bölümde, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma etkileri nedeniyle ağır hasar görmüş betonarme bir binanın, çarpışma öncesi ve sonrası durumları için gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlere ait detaylar sunulmuştur. Çalışma kapsamında ele alınan binanın deprem öncesi ve deprem sonrası durumuna ait görseller Şekil 24’te sunulmuştur. Bu kapsamda, öncelikle çalışmaya konu olan bina ile ilgili genel bilgilerden bahsedilmiş, binaya ait malzeme özellikleri, taşıyıcı sistem bilgileri, yerel zemin sınıfına ait veriler, kalıp planları ve kesit detayları verilmiştir (Şekil 25). Daha sonra analizler sırasında kullanılacak deprem ivme kayıtlarının seçimi ve işlenmesi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.



Şekil 24. Seçilen binanın 2023 Kahramanmaraş depremleri öncesi ve sonrasına ait görseller

Şekil 24'ün devamı



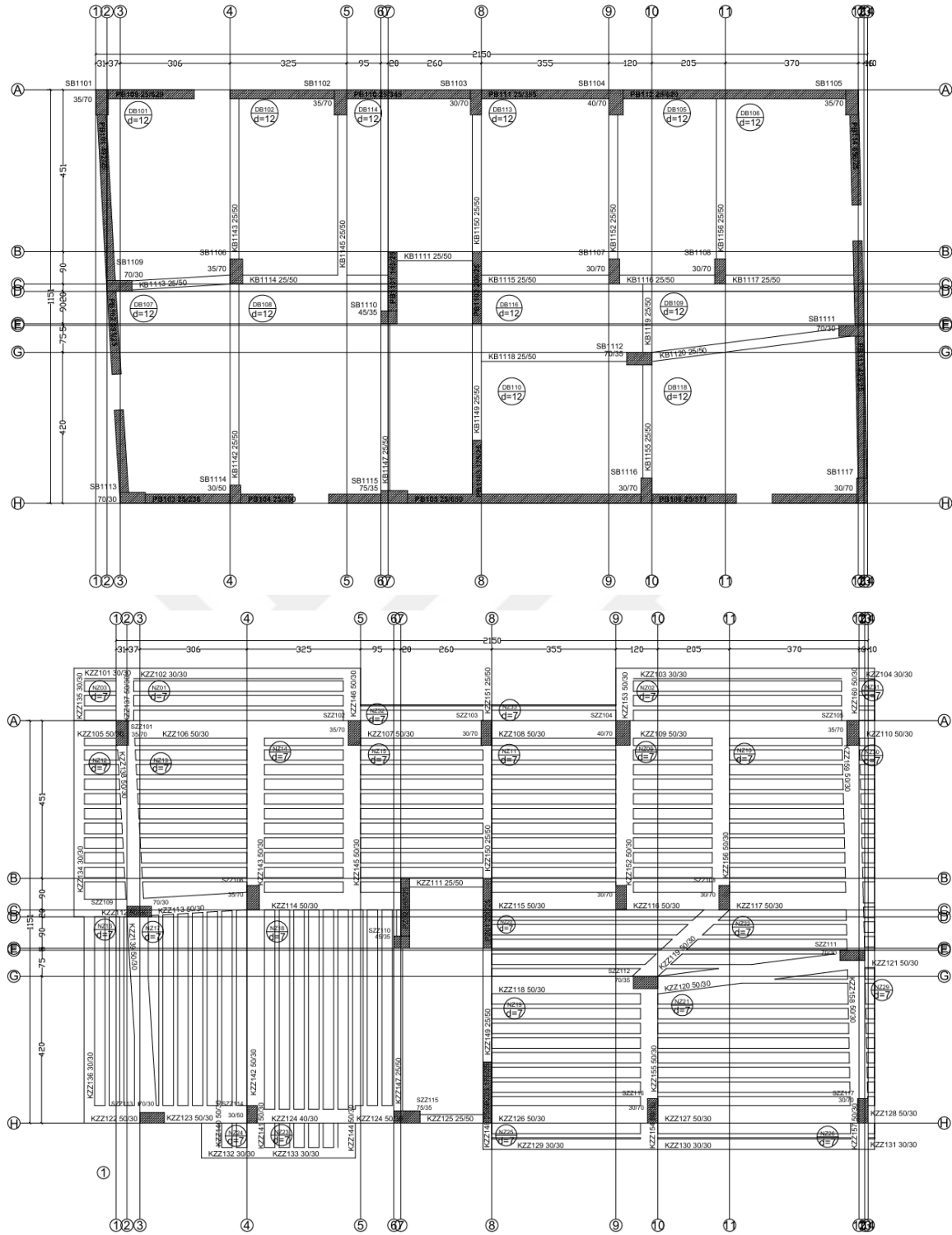
2.2. İncelenen Yapı Hakkında Genel Bilgiler

Bu tez kapsamında incelenen yapı, 2014 yılında konut ve ticari kullanımı bir arada barındıracak şekilde tasarlanmış ve projelendirme sürecinde 2007 tarihli “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” esas alınmıştır. Yapı, 2007 yönetmeliğine göre Z2 zemin sınıfında yer alan B grubu bir zemin üzerine inşa edilmiştir.

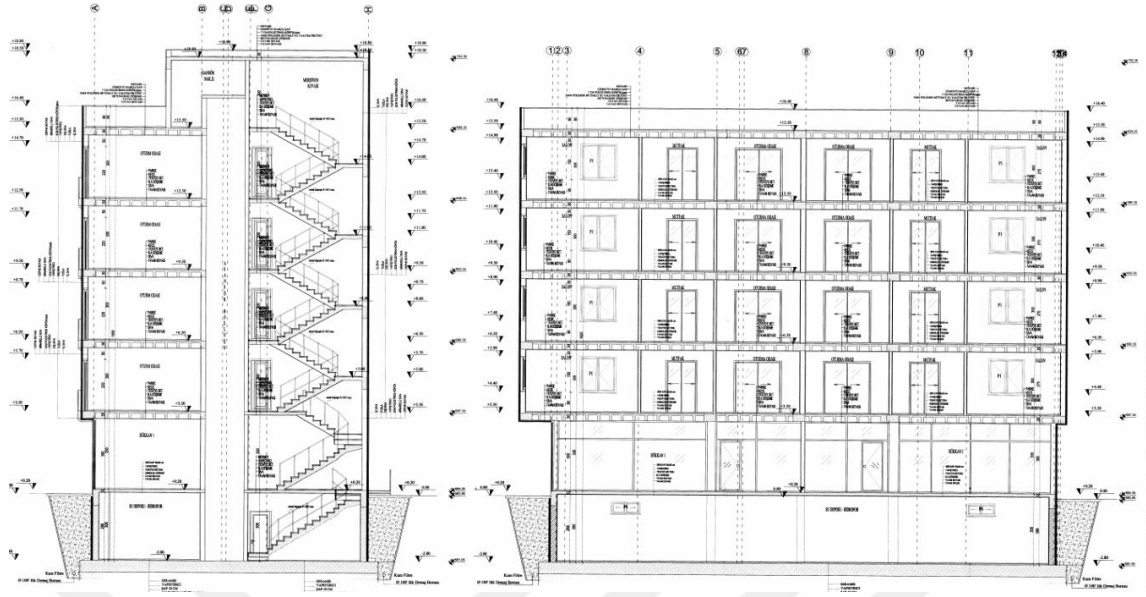
Bina toplam altı kattan oluşmakta olup; bodrum, zemin ve dört normal kat şeklinde düzenlenmiştir. Bodrum kat tamamen zemine gömülü olup çevresi 25 cm kalınlığında betonarme perde duvarlarla sınırlandırılmıştır. Döşeme sistemi bodrum katta kirişli plak, diğer katlarda ise asmolen döşeme olarak uygulanmıştır (Şekil 25 ve Şekil 26).

Yapının oturum alanı 242 m², toplam brüt inşaat alanı ise 1168 m²'dir. Bodrum ve zemin katın plan boyutları 21.50×11.51 m'dir. Kat yükseklikleri; bodrum katta 3.00 m, zemin katta 3.30 m ve diğer katlarda 3.00 m olarak belirlenmiştir.

Taşıyıcı sistem, betonarme çerçeve + perde sistemi olarak projelendirilmiştir. Yapıda kullanılan malzeme özellikleri; beton için C25 sınıfı ($f_{ck} = 25\text{MPa}$), çelik donatı için S420 sınıfı ($f_{yk} = 420\text{MPa}$) olarak belirlenmiştir. Betonun elastisite modülü 30000 MPa, Poisson oranı 0.20 ve birim hacim ağırlığı 25 kN/m³; donatı çeliğinin elastisite modülü ise 200000 MPa, birim hacim ağırlığı 76.97 kN/m³'tür.



Şekil 25. Seçilen binaya ait bodrum, zemin, normal kat kalıp planları



Şekil 26. Seçilen binaya ait kesit detayları

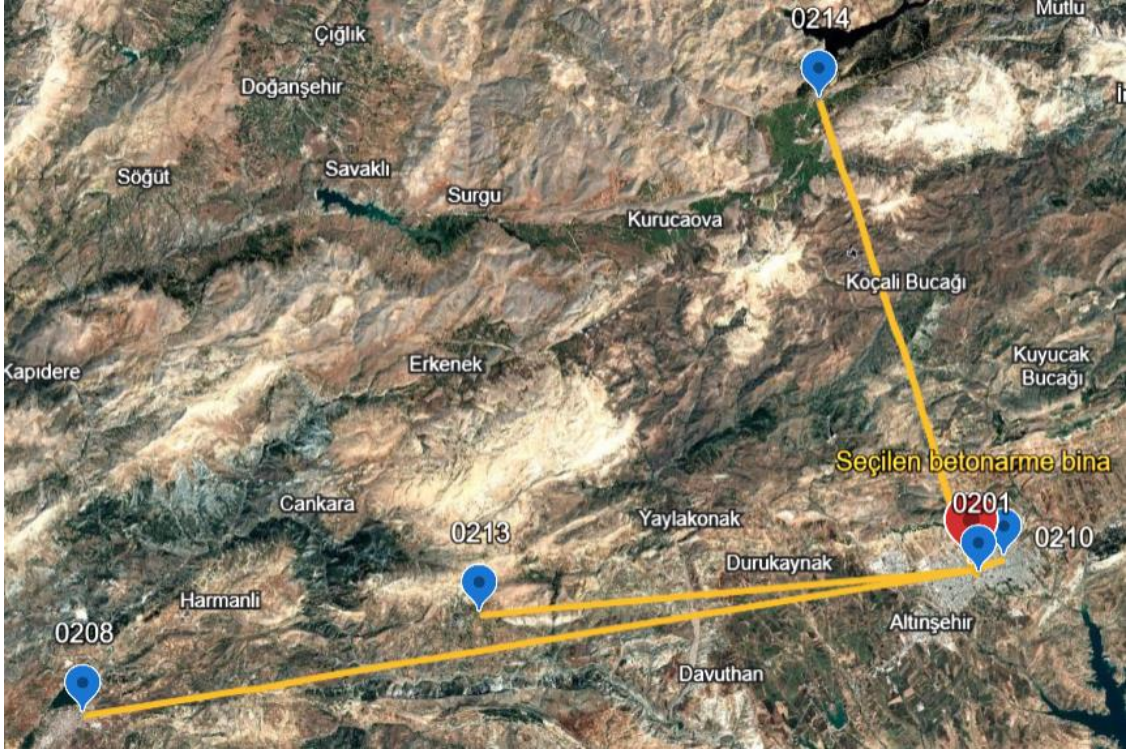
Tablo 1. Seçilen bina hakkında genel bilgiler

Yapı hakkında genel bilgiler	
Kullanım amacı	Ticari + Konut
Kat alanları	Bodrum ve normal katlar: 242 m ² Normal kat: 296 m ²
Bina yüksekliği	18.3m
Kat yükseklikleri	Bodrum ve normal katlar: 3.00m Zemin kat: 3.30m
Döşeme sistemi	Asmolen döşeme
Taşıyıcı sistem elemanlarının özellikleri	
Kolon kesitleri	30×70cm, 35×70cm, 30×50cm, 45×35cm 40×70cm, 70×30cm, 70×35cm
Kiriş kesitleri	50×30 cm, 25×50cm,
Döşeme kalınlığı	7cm
Malzeme ve zemin özellikleri	
Beton	C25 ($f_{ck} = 25\text{MPa}$) $E_c = 30000\text{ Mpa}$
Donatı	S420 ($f_{yk} = 420\text{MPa}$) $E_s = 200000\text{ MPa}$
Zemin sınıfı	Z2 (DBYBHY-2007 göre)
Dolgu duvarlar	
Duvar tipi	Tuğla duvar

2.3. Yer Hareketinin Seçimi

Yapılan çalışma kapsamında, çeşitli çarpışma senaryoları altında seçilen yapının performansını ortaya koymak ve çarpışma etkilerini araştırmak amacıyla 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait gerçek ivme kayıtları kullanılmıştır. Kayıtlardan ilki merkez üssü Pazarcık olan $M_w=7.7$ büyüklüğündeki depreme aitken, ikincisi ise merkez üssü Elbistan olan $M_w=7.6$ büyüklüğündeki ikinci depreme aittir. Bu depremlere ait ivme kayıtları Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD) tarafından geliştirilen Türkiye İvme Veri tabanı ve Analiz Sisteminden (AFAD-TADAS) elde edilmiştir.

Deprem kayıtlarının seçimi sırasında, konut binasına en yakın ivmeölçer istasyonlarından elde edilen veriler öncelikli olarak incelenmiştir. Kahramanmaraş-Pazarcık depremi sırasında, binaya en yakını 536 metre, en uzağı 29 kilometre mesafede bulunan beş istasyonda, depremin tamamı kaydedilememiştir (Şekil 27).



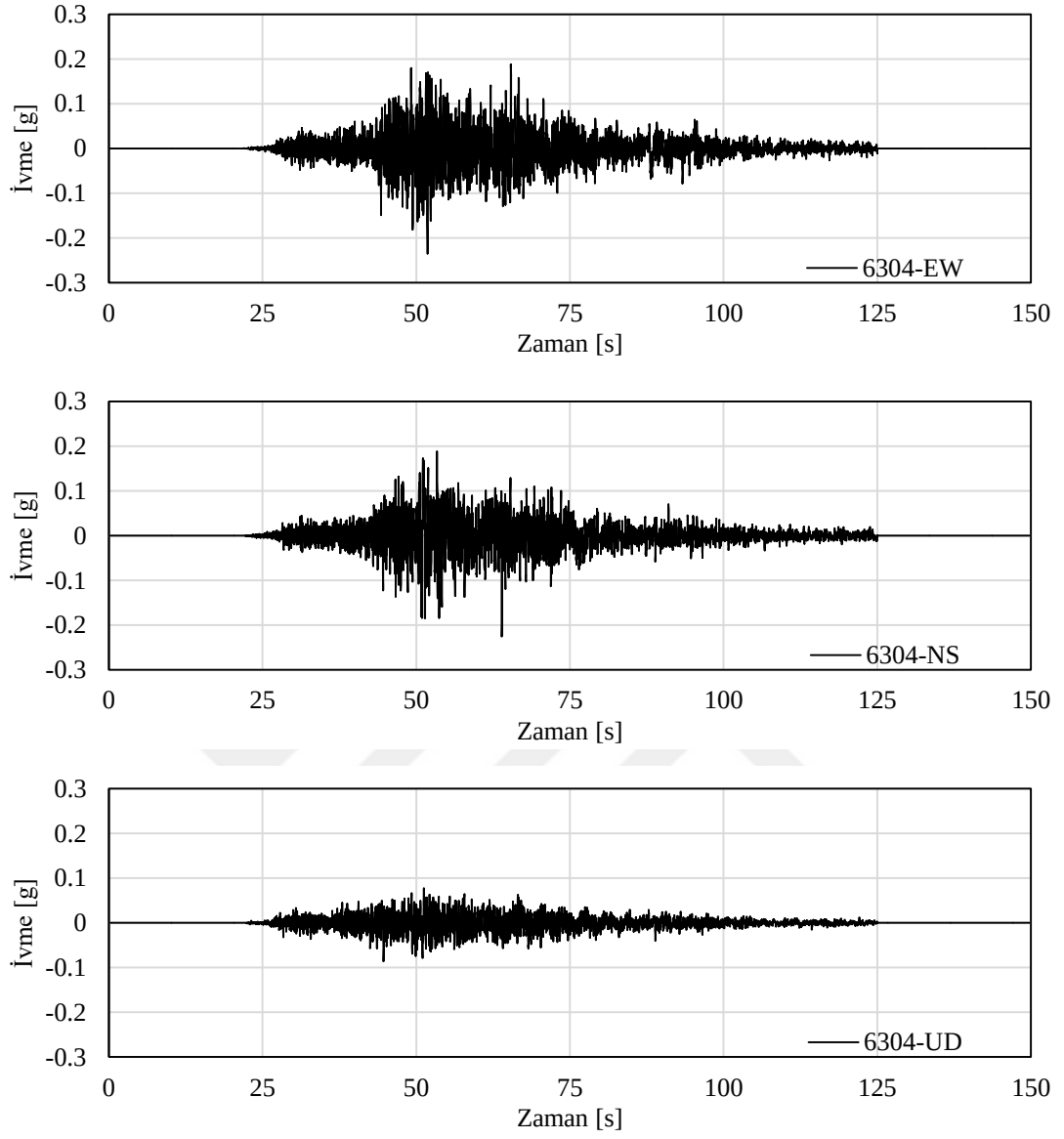
Şekil 27. Seçilen binaya yakın konumda bulunan ve deprem sırasında veri kaybı yaşanan istasyonlar

Yapının davranışını değerlendirirken uygun yer hareketi kayıtlarının seçilmesi amacıyla konut binası ile depremlerin merkez üsleri arasındaki mesafeler hesaplanmıştır. Binanın Pazarcık depremi merkez üssüne olan uzaklığı yaklaşık 120 km iken, merkez üssü Elbistan'a

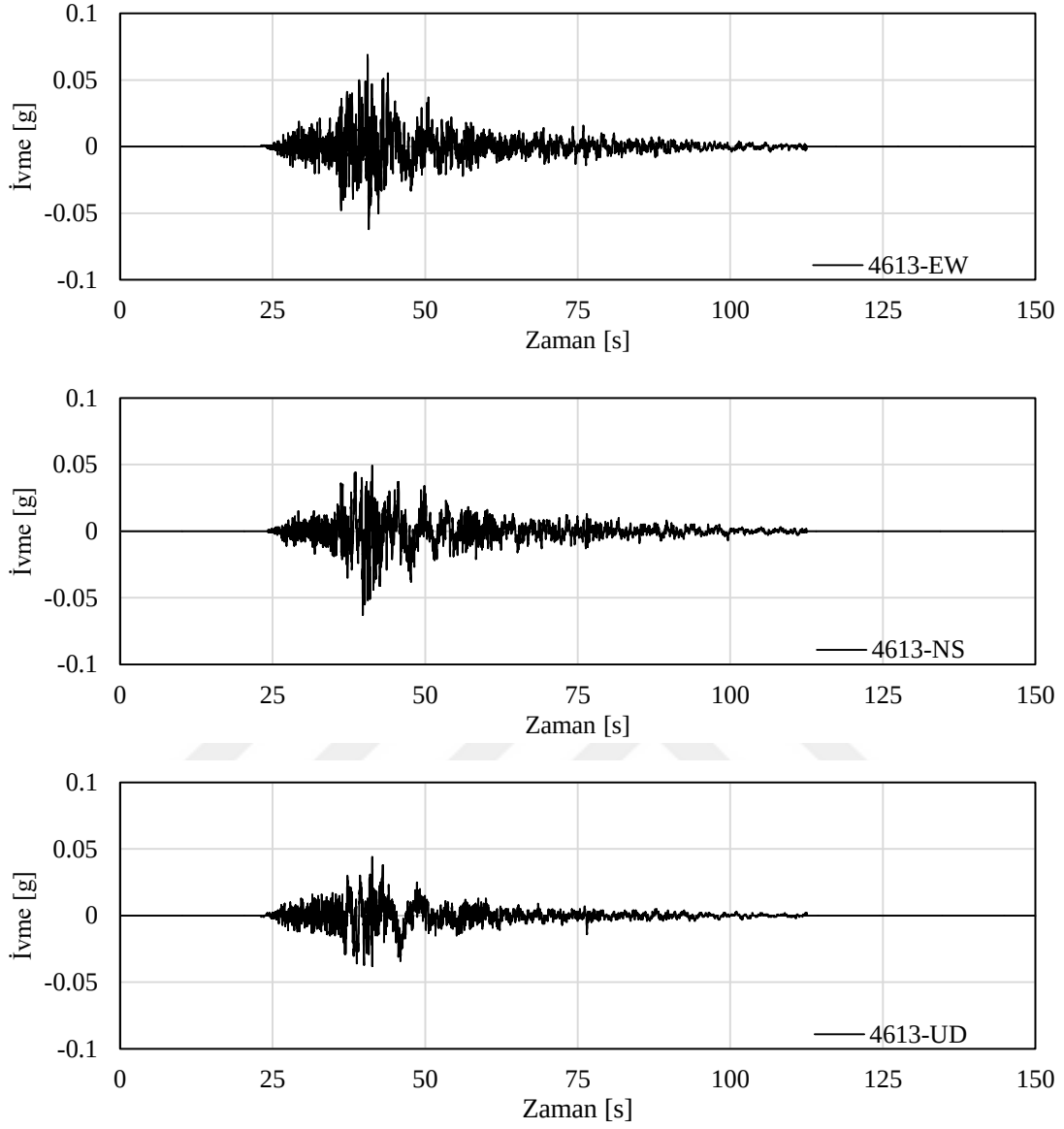
olan uzaklığı yaklaşık 96 km'dir. Uygun yer hareketinin belirlenebilmesi için sırasıyla 120 km ve 100 km yarıçapı içindeki istasyonlar listelenmiştir. Binanın bulunduğu yerel zemin koşullarını yansıtmayan istasyonlar listeden çıkarılmıştır. Sonuç olarak Pazarcık depremi için depremin merkez üssünden 130.27 km uzaklıktaki 6304 numaralı istasyon, Elbistan depremi için merkez üssünden 96.56 km uzaklıktaki 4613 numaralı istasyondan elde edilen kayıtlar analizlerde kullanılmak üzere seçilmiştir (Şekil 28). Seçilen istasyonların binanın zemin koşullarını yansıtıp yansıtmadığını anlayabilmek adına kayma dalgası hızı kontrol edilmiştir. Bina ZC sınıfı bir zemin üzerine inşa edilmiş olup bu zemin sınıfına karşılık gelen kayma dalgası hızı 360–760 m/s aralığında değişmektedir. Seçilen istasyonların zemin özellikleri incelendiğinde ise 6304 numaralı istasyonda $V_{s30}=376$ m/s, 4613 numaralı istasyonda ise $V_{s30}=490$ m/s'dir. Dolayısıyla, bu istasyonların binanın bulunduğu zemin koşullarını yeterli düzeyde temsil ettiğini görülmüştür. Kayıtlara herhangi bir ölçekleme işlemi uygulanmadan sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Şekil 29 ve Şekil 30'da seçilen bu kayıtlara ait ivme-zaman grafikleri ve Şekil 31'de %5 sönüm oranı için oluşturulan tepki spektrumları sunulmuştur.



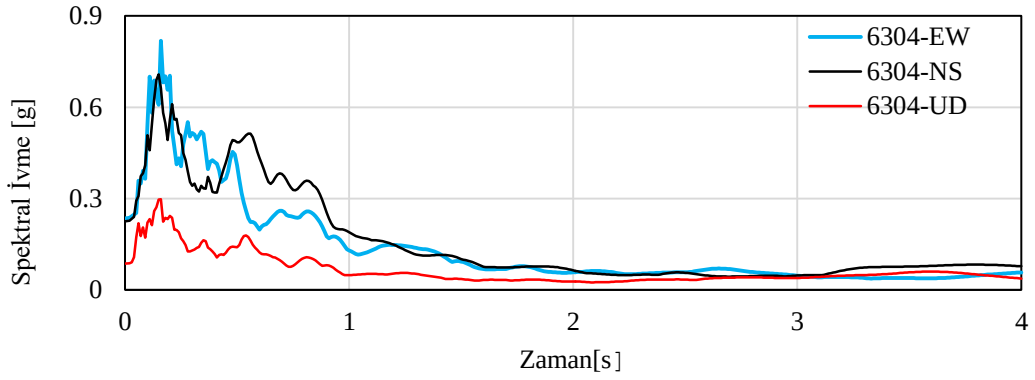
Şekil 28. Seçilen istasyonların depremin merkez üssüne ve binaya göre konumları



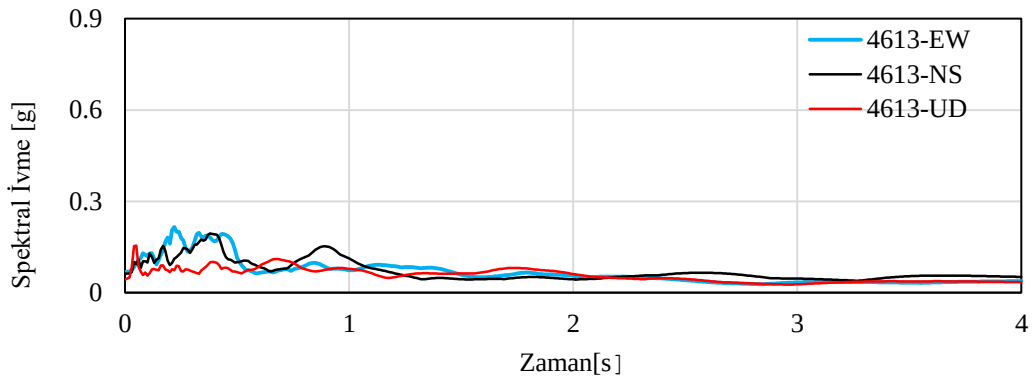
Şekil 29. Kahramanmaraş-Pazarcık Depremi'ne ait 6304 numaralı istasyondan elde edilen ivme kayıtları



Şekil 30. Kahramanmaraş-Elbistan Depremi'ne ait 4613 numaralı istasyondan elde edilen ivme kayıtları



(a) Pazarcık Depremi



(b) Elbistan Depremi

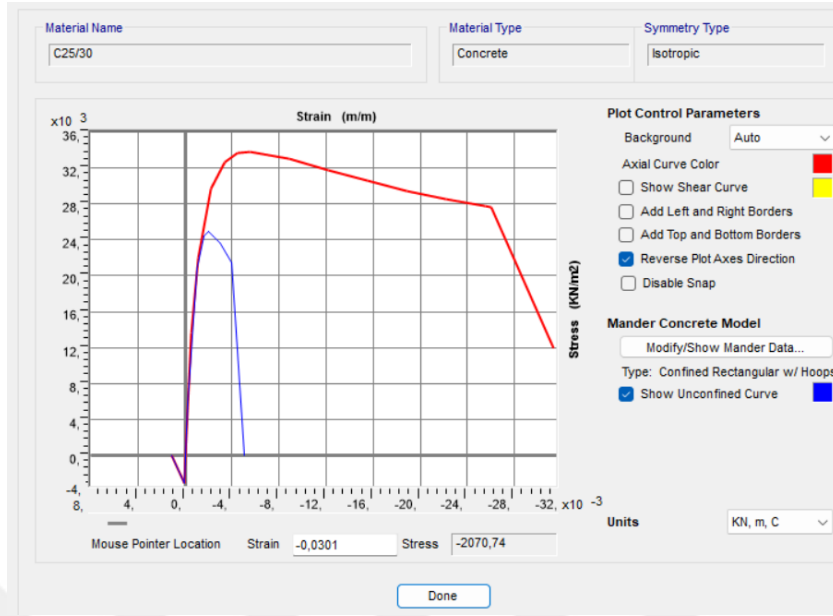
Şekil 31. Kahramanmaraş depremleri için elde edilen tepki spektrumları (a. Pazarcık depremi, b. Elbistan depremi)

2.4. Binanın Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

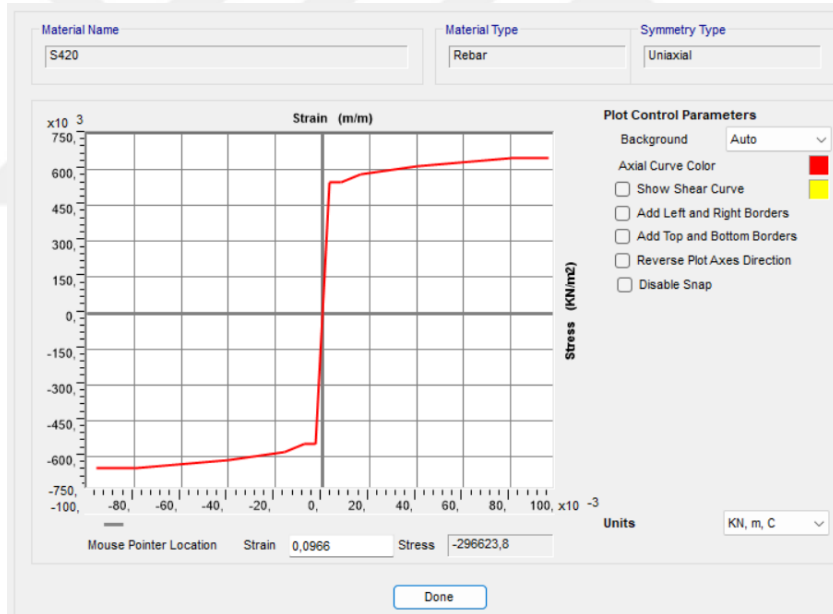
İncelenen betonarme yapıya ait sonlu eleman modeli SAP2000’de programında oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, TBDY-2018 kapsamında, “5.4. Doğrusal Olmayan Hesap İçin Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Modellenmesine İlişkin Kurallar” başlığı altında belirtilen esaslar dikkate alınmıştır.

2.4.1. Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

Çalışmaya konu olan binanın statik projesi incelendiğinde, betonun C25/30, donatı çeliğinin ise S420 sınıfında kullanıldığı belirlenmiştir. Bu doğrultuda, malzeme özellikleri Bölüm 1.7’de belirtilen kriterler dikkate alınarak SAP2000 programına tanımlanmıştır. Şekil 32’de tanımlanan örnek gerilme–şekil değiştirme diyagramları sunulmuştur.



(a)



(b)

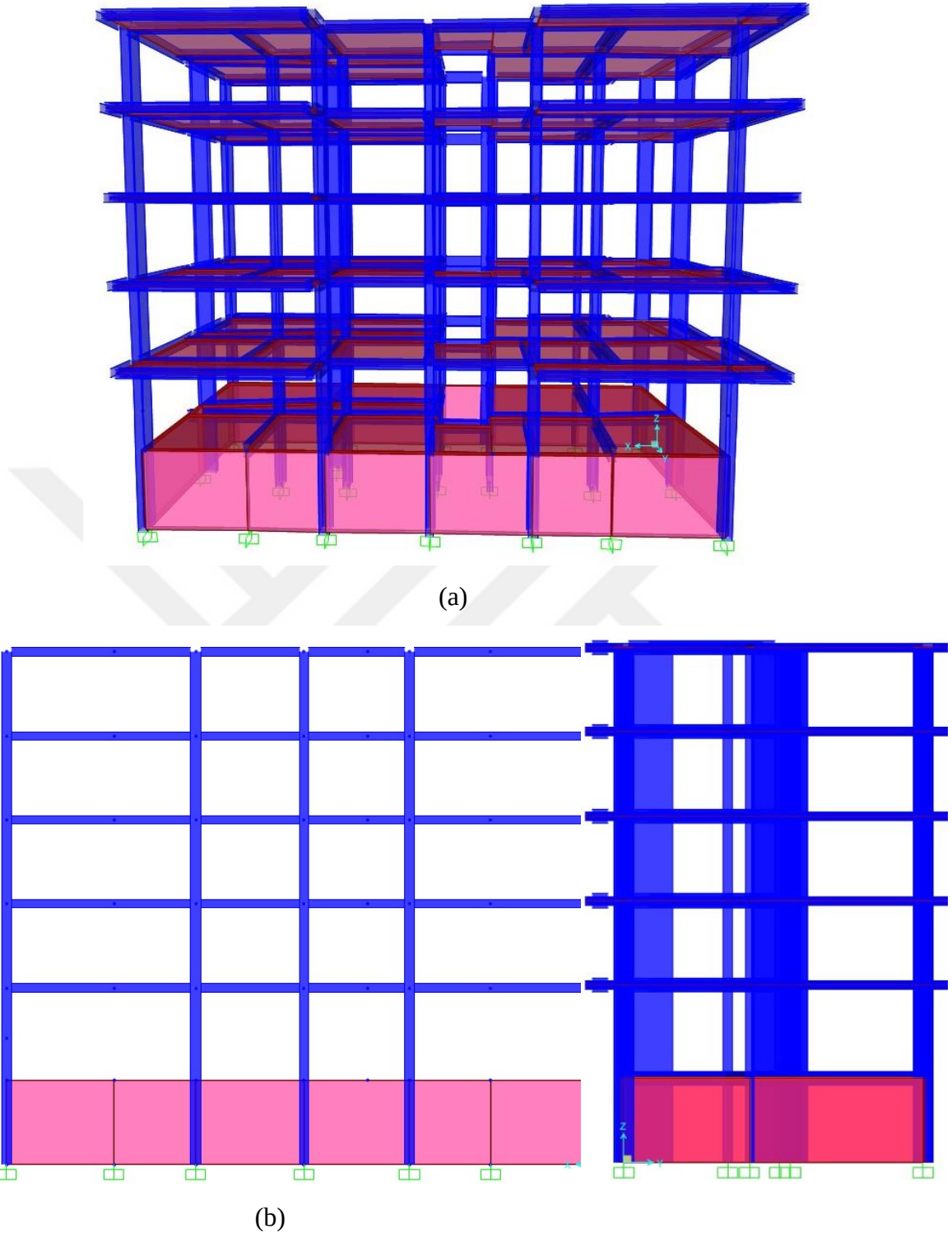
Şekil 32. Beton (a) ve çeliğe (b) ait gerilme ve şekil değiştirme diyagramları

2.4.2. Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Tanımlanması

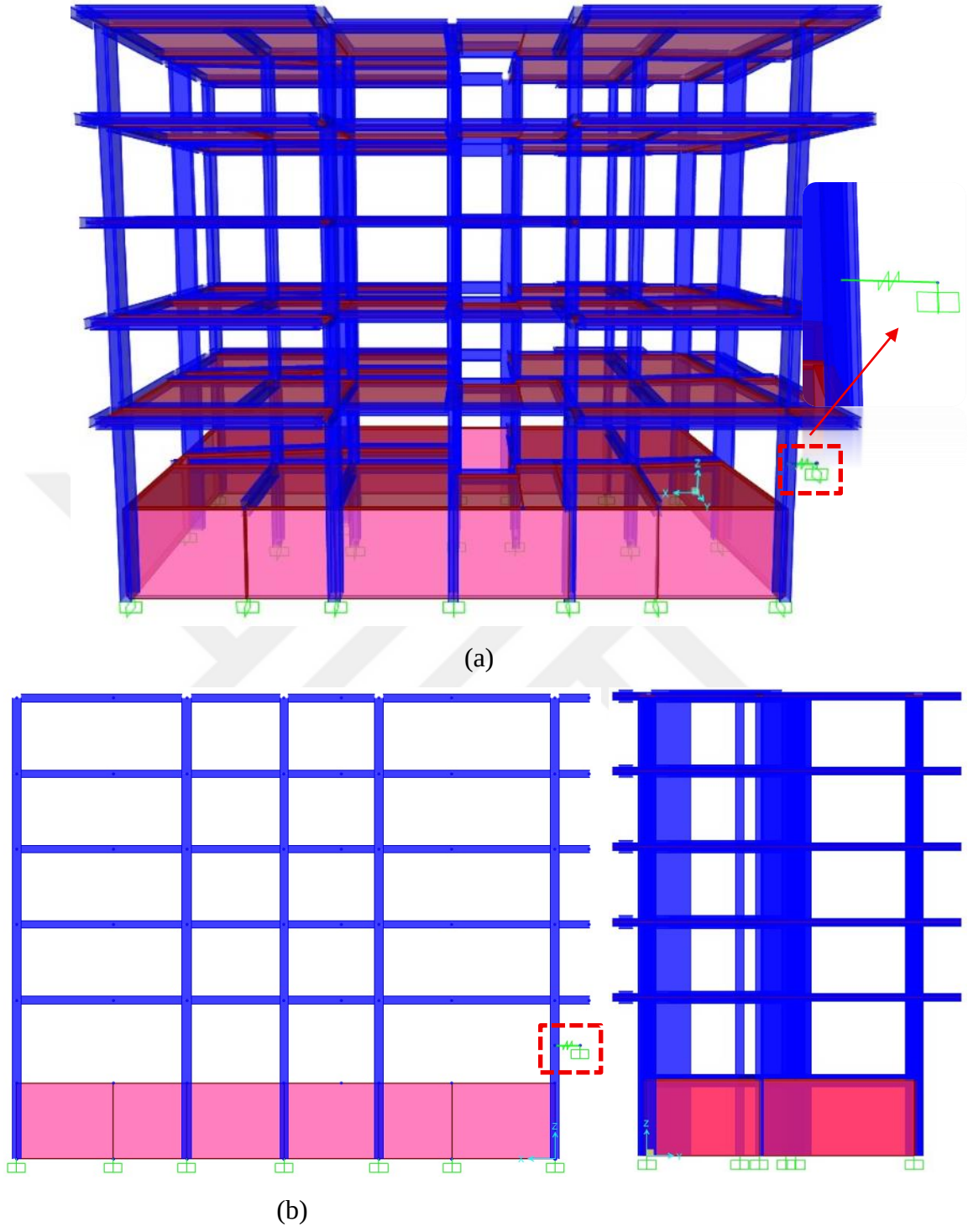
SAP2000 programı aracılığıyla, farklı çarpışma senaryolarını temsil eden beş ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Referans model olan çarpışmasız durumda, yapının yalnızca kendisi modellenmiş olup, çevresinde herhangi bir çarpışma elemanına yer

verilmemiştir. Durum-1, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde gözlemlenen kolon–duvar çarpışmasını yansıtmaktadır. Bu senaryoda, zemin kat seviyesindeki kolon ile çevre duvar arasında çarpışmayı temsil etmek amacıyla, kolon alt ucundan 1.5 m yukarıda bir çarpışma elemanı tanımlanmıştır. Durum-2, karşılıklı iki cephede kolon–duvar çarpışmasının gerçekleştiği durumun olası etkilerinin değerlendirilmesine yönelik bir senaryodur. Durum-3 yalnızca bir cephede, Durum-4 ise karşılıklı iki cephede, çevre duvarın zemin kat döşeme seviyesiyle çarpıştığı senaryoyu temsil etmektedir (Şekil 33-37).

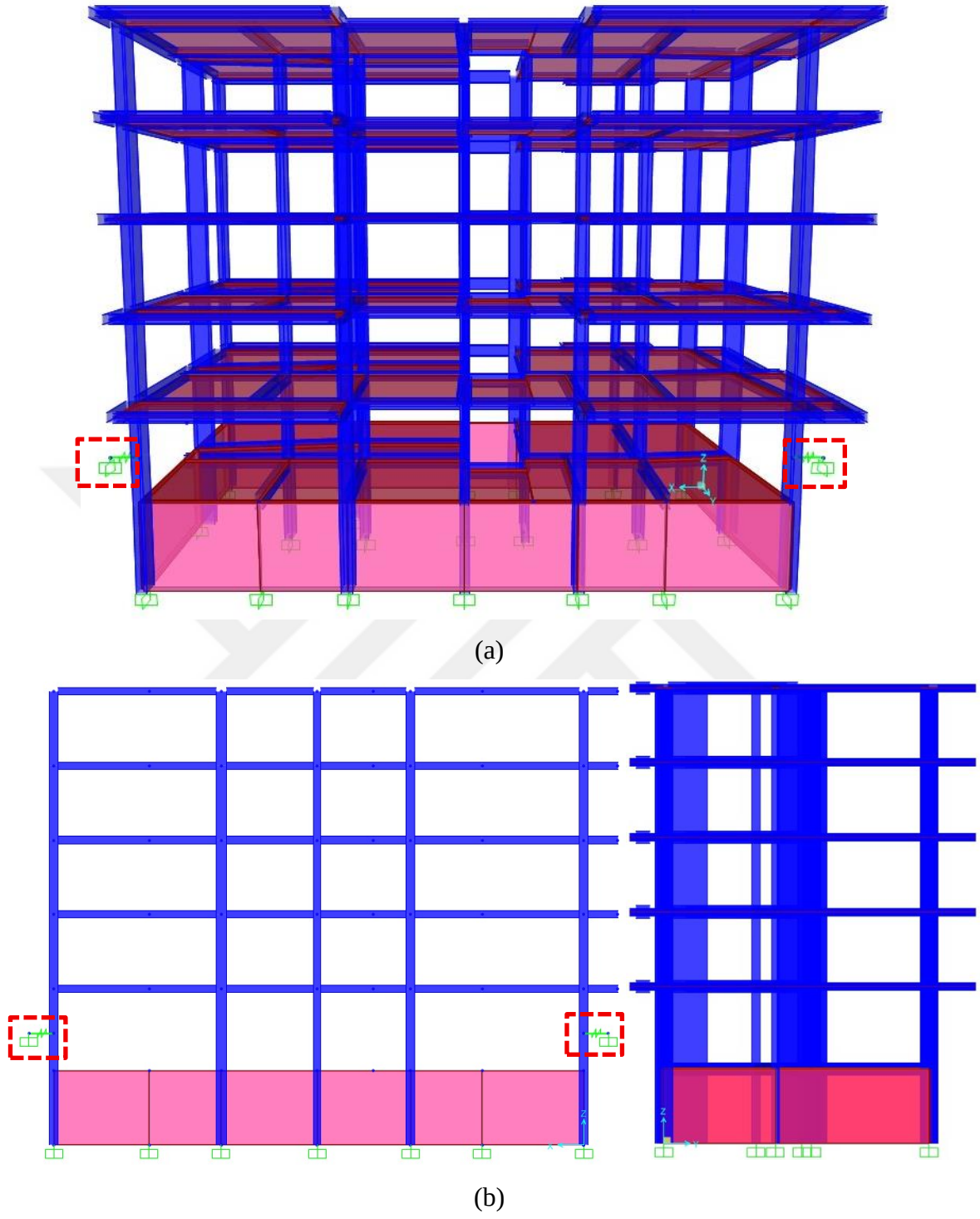




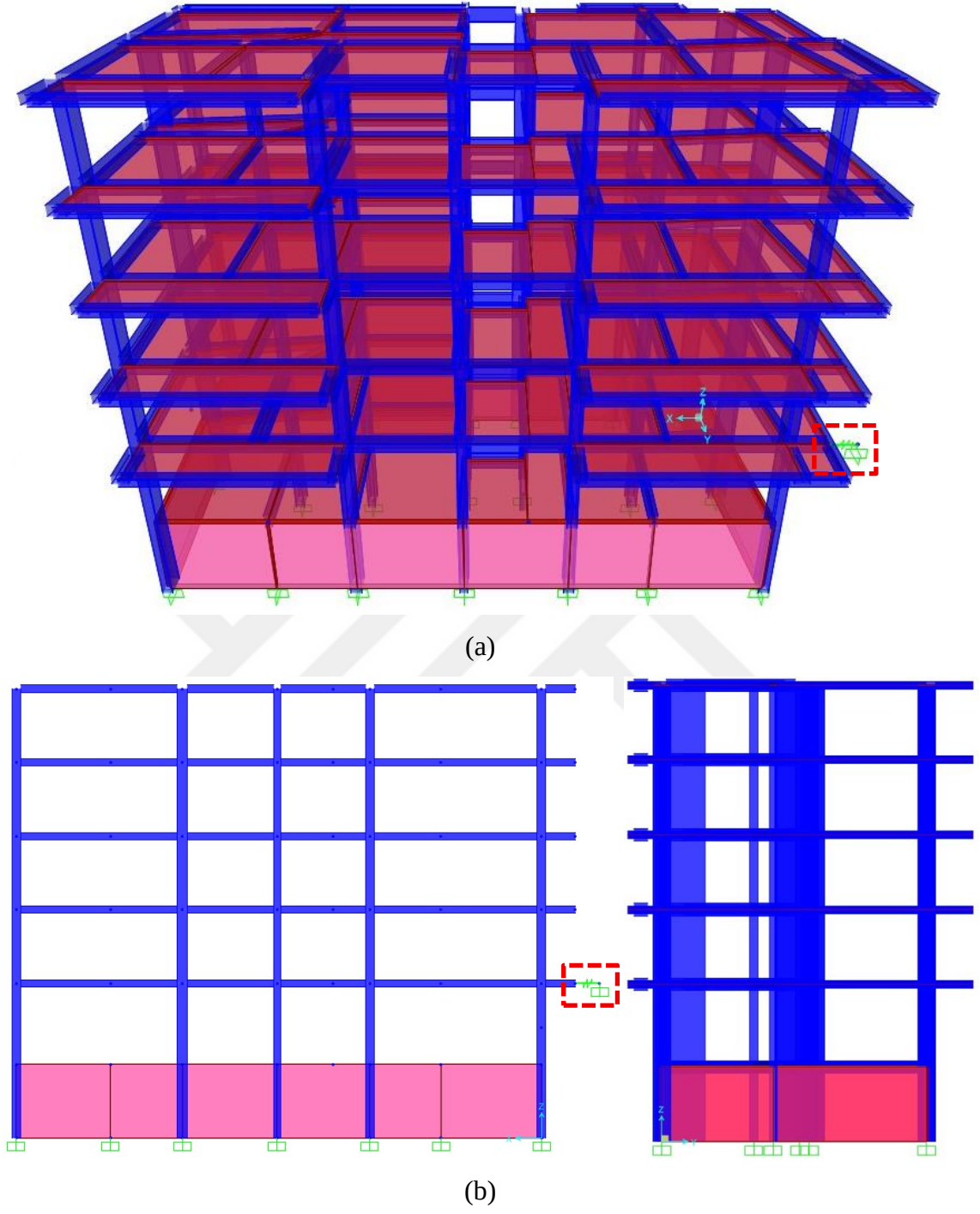
Şekil 33. Çarpışmasız durum için oluşturulan referans modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görüşleri



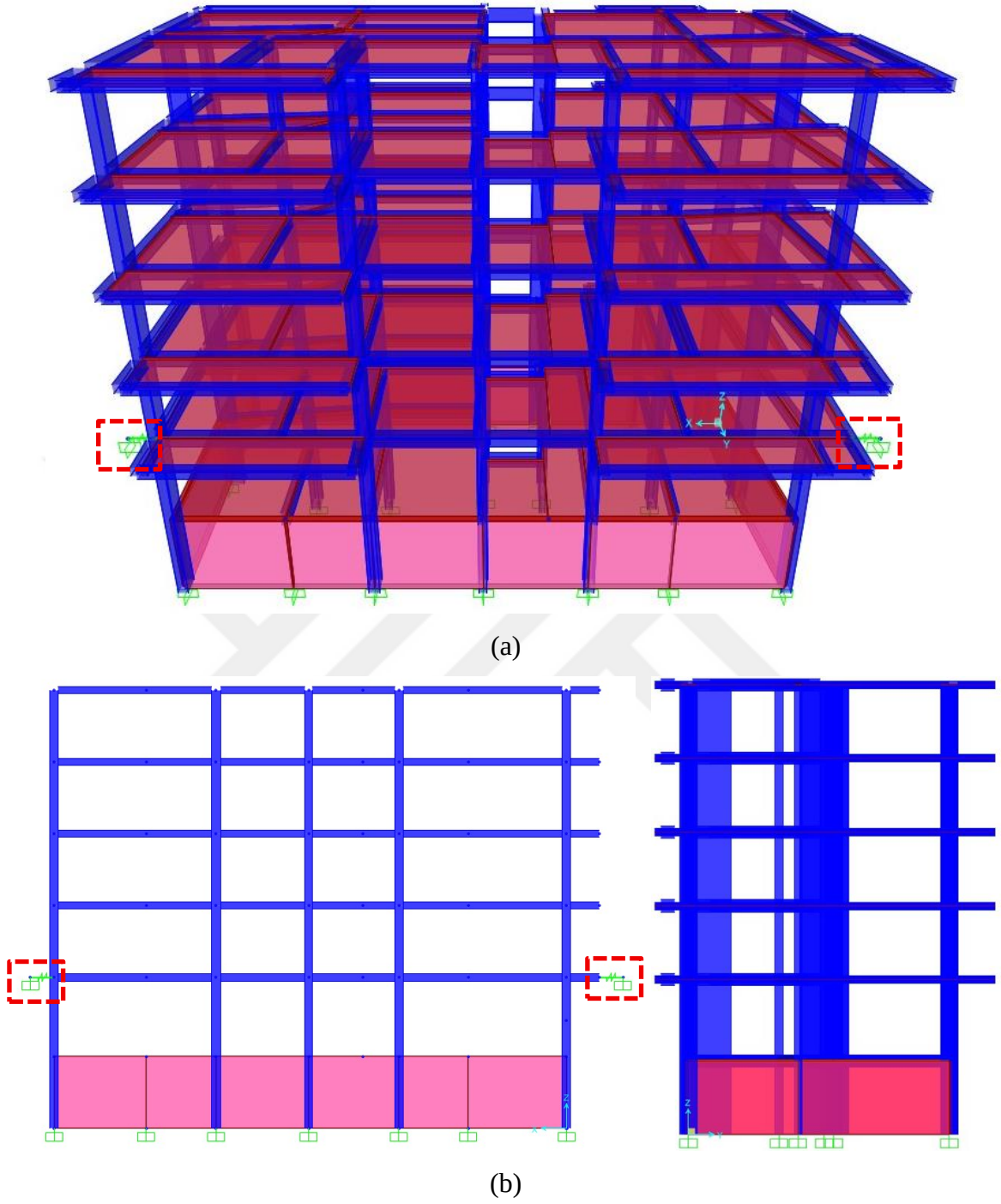
Şekil 34. Durum-1 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri



Şekil 35. Durum-2 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri



Şekil 36. Durum-3 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri



Şekil 37. Durum-4 için oluşturulan modelin (a) 3 boyutlu ve (b) kesit görünüşleri

Modellemesi yapılan betonarme yapının taşıyıcı sistemi kolon, kiriş ve perde elemanlarından oluşmakta olup, her bir elemanın boyutları ve konumları yapının mimari ve statik projeleri esas alınarak tanımlanmıştır. TBDY- 2018 kapsamında, Madde 5.4.2 ve Madde 5.4.3 doğrultusunda, bu taşıyıcı sistem elemanları çubuk sonlu elemanları ile temsil

edilmiştir. Ayrıca, Madde 5.4.4 uyarınca özel durumlar dışında bina çevresindeki bodrum kat perdeleri ve yapıdaki döşemeler için doğrusal olmayan davranışın modellenmesine gerek duyulmadığından, söz konusu elemanlar doğrusal kabul edilmiştir. Bu elemanlar için TBDY-2018 Tablo 4.2’de belirtilen etkin kesit rijitlikleri esas alınarak doğrusal modelleme yapılmıştır. Bu doğrultuda, bodrum kat çevresindeki perde duvarlar ile tüm döşemeler kabuk elemanlar ile modellenmiştir.

Yapıya ait kolon, kiriş ve perde kesitlerinin donatı detayları, SAP2000 yazılımının Section Designer arayüzü kullanılarak tanımlanmıştır. Bu modülde her bir betonarme eleman için kesit geometrisi manuel olarak girilmiş, beton sınıfı ve donatı çeliği özellikleri yapı projesinde belirtilen değerlere göre tanımlanmıştır. Boyuna donatılar, beton kesit üzerinde gerçekçi yerleşimlerine uygun olarak konumlandırılmış; etriye ve çiroz donatıları sünek davranışı temsil edecek biçimde modellenmiştir. Ayrıca, donatının çapı, yerleşim aralığı, pas payı gibi parametreler ayrı ayrı girilmiştir.

2.4.3. Yapıya Etkiyen Yüklerin Tanımlanması

Yapıya etkiyen yüklerin ilgili elemanlara tanımlanması aşamasında, asmlen döşemenin dolgu yükü ve nervür kirişlerinin ağırlığı hesaplanarak döşemenin kendi ağırlığına ek ölü yük şeklinde uygulanmıştır. Hareketli yükler belirlenirken Türk Standardı 498 “Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri” (TS 498, 2021) esasları dikkate alınmıştır. Bu standarda göre mimari kullanım esas alınarak tipik kat döşemelerine 2 kN/m^2 , balkon döşemelerine ise 5 kN/m^2 hareketli yük uygulanmıştır. Kirişlere etkiyen duvar yükleri, 10 cm kalınlığındaki duvarlar için 6.75 kN/m , 20 cm kalınlığındaki duvarlar için ise 8.64 kN/m olarak hesaplanmıştır. Çatı katında ise $1,5 \text{ kN/m}^2$ hareketli yük dikkate alınmış ve bu katta kirişlere duvar yükleri atanmamıştır. Tablo 2’de binaya etkiyen yükler özetlenmiştir.

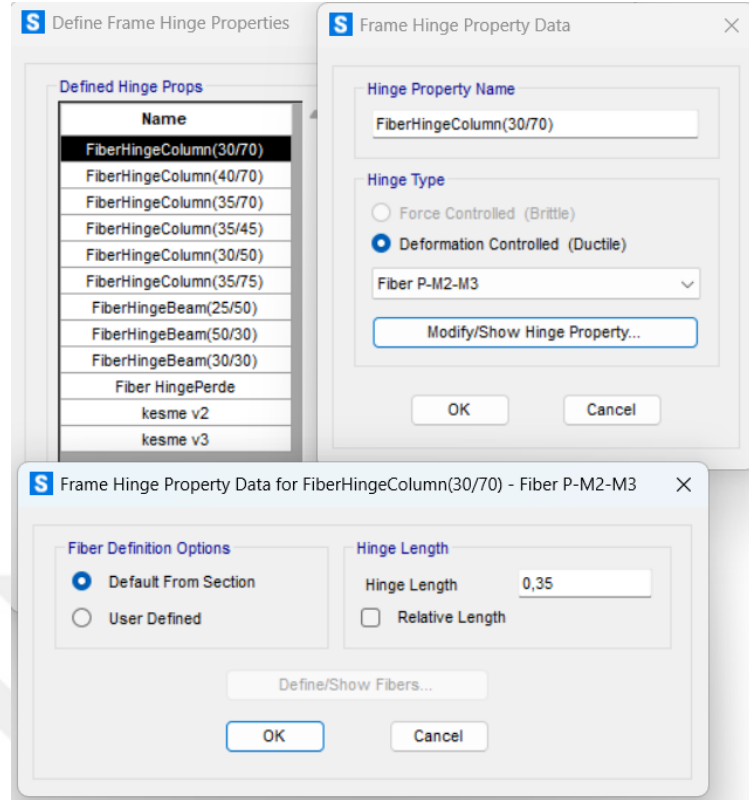
Tablo 2. Yapıya etkiyen yükler

Uygulanan yükler	
Döşeme sabit yükü	3.0 kN/m ²
Döşeme hareketli yükü	Odalar: 2.0 kN/m ²
	Merdiven: 3.5 kN/m ²
	Balkonlar: 5.0 kN/m ²
	Dükkân: 5.0 kN/m ²
10cm duvar yükü	6.75 kN/m
20cm duvar yükü	8.64 kN/m

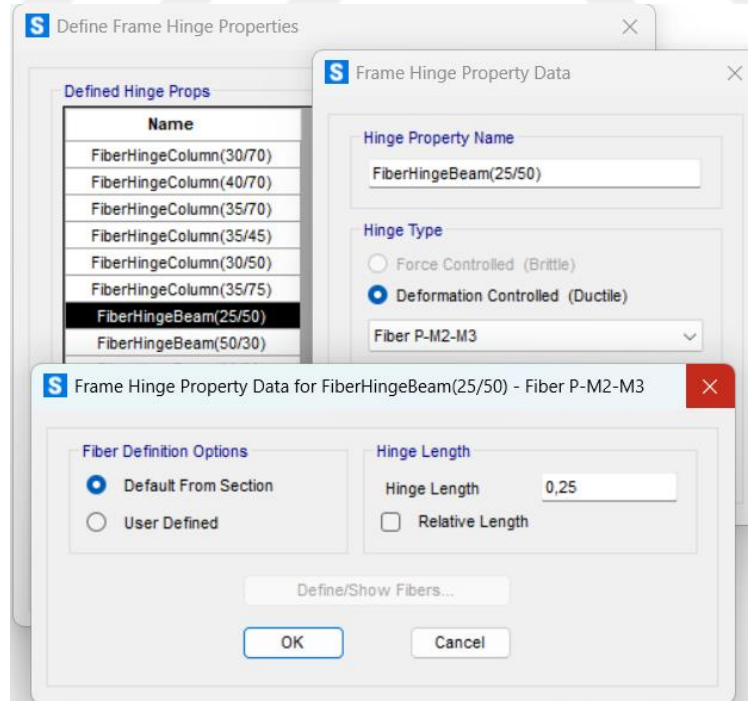
Tanımlanan bu yüklerin analiz modelinde kat düzleminde düşey taşıyıcılara dengeli ve doğru şekilde aktarılabilmesi amacıyla, her kata rijit diyafram tanımlaması yapılmıştır. Rijit diyafram kabulü, deprem etkisi altında döşeme düzleminde herhangi bir şekil değiştirmenin oluşmadığı veya ihmal edilebilecek düzeyde olduğu varsayımına dayanır. Bu varsayım doğrultusunda, döşemelerin düzlem içi deformasyonları analiz sırasında dikkate alınmaz. Böylece döşemeler, bulundukları kat düzlemini bir bütün olarak hareket ettiren yatay rijitlik elemanları gibi davranır. SAP2000 programında rijit diyafram tanımlanarak, aynı katta yer alan tüm düğüm noktalarının yatay düzlemde birlikte hareket etmeleri sağlanmakta ve böylece yatay yüklerin kolonlar ve perdeler gibi düşey taşıyıcılara etkin bir biçimde aktarılması mümkün hale gelmektedir.

2.4.4. Sonlu Elemanlarda Plastik Mafsalları Tanımlanması

Yapının doğrusal olmayan davranışını temsil edebilmek amacıyla, taşıyıcı elemanlara plastik mafsalların tanımlanması gereklidir. Bu çalışmada, SAP2000 yazılımının sağladığı plastik mafsalları tanımlama arayüzü kullanılarak, her bir eleman için uygun plastik mafsalları modeli atanmıştır. Yapının doğrusal olmayan davranışını daha gerçekçi temsil edebilmek amacıyla, analizlerde yayılı plastik davranış modeli tercih edilmiştir. Düşey taşıyıcı elemanlar olan kolon ve perdeler hem eksenel kuvvet hem de eğilme momentine (bileşik eğilme) maruz kaldıkları için bu elemanlara P-M2-M3 etkileşimli plastik mafsallar tanımlanmıştır (Şekil 38). Kiriş elemanlarında ise eğilme momenti dışındaki etkiler ihmal edilebilecek düzeydedir fakat yalnızca eğilme davranışını temsil eden M3 momentine özgü bir fiber mafsalları tanımı yapılmadığından, bu elemanlara da P-M2-M3 tipi plastik mafsalları atanmıştır (Şekil 39).



Şekil 38. SAP2000 programında kolonlar için plastik mafsıl tanımlanması



Şekil 39. SAP2000 programında kirişler için plastik mafsıl tanımlanması

Çarpışmadan dolayı kolonda oluşacak ani kesme hasarını belirleyebilmek için elemanların kesme kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında çarpışmaya maruz kalan kolonun kesme kapasitesi TS500' de yer alan denklem 2'ye göre hesaplanmıştır. Bu denklemde yer alan f_{ctk} beton karakteristik çekme dayanımını, f_{ywd} enine donatı tasarım akma dayanımını, b_w kesit gövde genişliğini, s etriye aralığını, d deprem doğrultusundaki kesitin faydalı yüksekliğini, A_c gövde kesiti alanını, A_{sw} kesme donatısı toplam kesit alanını, γ çatlama dayanımına eksenel kuvvet etkisini yansıtan katsayıyı, N_d tasarım eksenel kuvvetini göstermektedir. Çarpışan kolonlarda oluşan hasarları gözlemlemek amacıyla SAP2000 programında kesme mafsalları tanımlanmıştır. Bu kesme mafsallarının tanımlanmasında, gevrek davranışı temsil eden kuvvet kontrollü mafsal türü tercih edilmiştir. Kesme mafsalları tanımlanırken, elemanın kesme kapasitesine ulaşıldığında taşıma güçlerini yitirdiği ve göçme durumuna geçtiği kabul edilmiştir.

$$V = 0.8 \left[0.65 f_{ctk} b_w d \left(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c} \right) \right] + \frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} d \quad (2)$$

2.4.5. Yer Hareketlerinin Tanımlanması ve Analiz Parametrelerinin Seçilmesi

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilebilmesi için, yapıya uygulanacak yer hareketi kayıtlarının modele eksiksiz şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, 2023 Kahramanmaraş depremlerine ait ivme kayıtları AFAD-TADAS üzerinden temin edilmiştir. Depremlere ait kayıtların her iki yatay bileşeni analizlerde dikkate alınmıştır. Ham ivme kayıtları, SeismoSignal yazılımında işlenmiş olup, zaman tanım alanı analizlerinde kullanılmak üzere SAP2000 programına tanımlanmıştır.

TBDY-2018'e göre doğrusal olmayan analizlerde, hesaplamalara başlamadan önce deprem dışındaki sabit ve hareketli yüklerin dikkate alındığı doğrusal olmayan artımsal statik bir hesap yapılması zorunludur (Madde 5.2.2.2). Bu işlem sonucunda elde edilen iç kuvvetler ile şekil değiştirmeler, deprem analizinde başlangıç koşulları olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmadan önce yapıya ($G + 0.3Q$) düşey yükleri altında bir başlangıç bir doğrusal olmayan yükleme tanımlanmıştır (Şekil 40)

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: PO **Set Def Name** **Modify/Show...**

Initial Conditions:
☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☐ Continue from State at End of Nonlinear Case
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
 All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	G	1.0
Load Pattern	Q	0.3

Geometric Nonlinearity Parameters:
☐ None
☒ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Mass Source: MSSSRC1

Other Parameters:
 Load Application: Full Load
 Results Saved: Final State Only
 Nonlinear Parameters: Default

Buttons: OK, Cancel

Şekil 40. Doğrusal olmayan statik analiz için seçilen analiz parametreleri

Deprem kayıtları için oluşturulan fonksiyonlar zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için “Define→ Load Cases” menüsü aracılığıyla zaman tanım alanı yük durumları içerisinde tanımlanmıştır. Analizlerde düşey deprem etkileri göz ardı edilmiş ve her iki yatay bileşen analizlerde kullanılmıştır. Deprem kayıtları analiz yönlerine uygun olacak şekilde x ve y doğrultularında tanımlanmıştır. Binanın kuzeyle olan açısı ile deprem kaydının yönü arasında 24°'lik bir açı farkı bulunması nedeniyle, ivme kayıtlarının uygulanma açıları da bu fark dikkate alınarak düzenlenmiştir. Analiz hassasiyetini etkileyen zaman adımı (Δt) ve toplam kayıt süresi gibi parametreler, ivme kayıtlarının özelliklerine uygun biçimde girilmiştir (Şekil 41). Ayrıca, taşıyıcı sistemin ikinci mertebe etkilerini göz önünde bulundurmak amacıyla, analizlerde geometrik nonlineerlik (P- Δ) etkileri de aktif hale getirilmiştir. SAP2000 programında viskoz sönüm matrisi, Rayleigh orantılı sönüm matrisi esas alınarak oluşturulmuştur. Bu amaçla doğrusal sönüm oranı %5 olarak dikkate alınmıştır. Rayleigh orantılı sönüm katsayılarının hesabından yapının ilk periyodu ve dikkate alınan son periyot değerleri dikkate alınmıştır.

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: TH-1 **Set Def Name** **Notes:** Modify/Show...

Load Case Type: Time History **Design...**

Initial Conditions:
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case **PO**
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
 Use Modes from Case: MODAL

Analysis Type:
☐ Linear
☒ Nonlinear

Solution Type:
☐ Modal
☒ Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters:
☐ None
☒ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor	Time Factor	Arrival Time	Coord Sys	Angle
Accel	U1	6304_E	9,81	1,	0,	GLOBAL	24,
Accel	U1	6304_E	9,81	1,	0,	GLOBAL	24,
Accel	U2	6304_N	9,81	1,	0,	GLOBAL	24,

☒ Show Advanced Load Parameters ☐ Show Objects to Remove **Add** **Modify** **Delete**

Time Step Data:
 Number of Output Time Steps: 12501
 Output Time Step Size: 0,01

History Type:
☒ Transient ☒ Consider Collapse
☐ Periodic

Mass Source: MSSSRC1

Other Parameters:
 Damping: Proportional **Modify/Show...**
 Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor **Modify/Show...**
 Nonlinear Parameters: Default **Modify/Show...**

OK **Cancel**

Şekil 41. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler için seçilen analiz parametreleri

2.4.6. Çarpışma Etkisinin Modellenmesi

Yapılar arası çarpışma etkisinin modellenebilmesi amacıyla SAP2000 programında Hertz çarpışma modeline dayalı çarpışma elemanları tanımlanmıştır. Bunun için, programda bir bağlantı elemanı oluşturulmuştur. Bağlantı tipi olarak MultiLinear Elastic eleman seçilmiş ve çarpışma yalnızca U1 yönünde gerçekleştiği için, bu doğrultuda serbestlik tanımlanmıştır. Ayrıca çarpışma etkisi, doğrusal olmayan elastik yay davranışıyla modellendiğinden, ilgili doğrultu için "Nonlinear" seçeneği de aktif hale getirilmiştir. Lineer olmayan analiz için yay rijitlik katsayısı Bölüm 1.7’de anlatıldığı üzere $1.13 \times 10^9 \text{ N/m}^{3/2}$ olarak alınmış ve Denklem (1) kullanılarak çarpışma kuvveti-yer değiştirme ilişkisi programa tanımlanmıştır. (Şekil 42).

Link/Support Property Data

Link/Support Type: MultiLinear Elastic
 Property Name: LIN1
 Set Default Name
 Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters
☒ Shear Couple
☐ Equal End Moments
☐ Advanced
 Modify/Show

Total Mass and Weight
 Mass: 0,
 Weight: 0,
 Rotational Inertia 1:
 Rotational Inertia 2:
 Rotational Inertia 3:

Factors For Line, Area and Solid Springs
 Property is Defined for This Length in a Line Spring
 Property is Defined for This Area in Area and Solid Springs

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties
☒ U1	☐	☒	Modify/Show for U1...
☐ U2	☐	☐	Modify/Show for U2...
☐ U3	☐	☐	Modify/Show for U3...

Fix All Clear All

Stiffness Options
 Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Ze
 Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0)
 Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor

Link/Support Directional Properties

Identification
 Property Name: LIN1
 Direction: U1
 Type: MultiLinear Elastic
 NonLinear: Yes

Properties Used For Linear Analysis Cases
 Effective Stiffness: 0,
 Effective Damping: 0,

Multi-Linear Force-Deformation Definition

	Displ	Force
1	-0,2	-101070,2726
2	-0,195	-97303,92534
3	-0,19	-93585,56032
4	-0,185	-89915,80485

Order Rows Delete Row 41 Add Row 43

Şekil 42. SAP2000'de tanımlanan Hertz tipi çarpışma elemanına ait parametreler

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

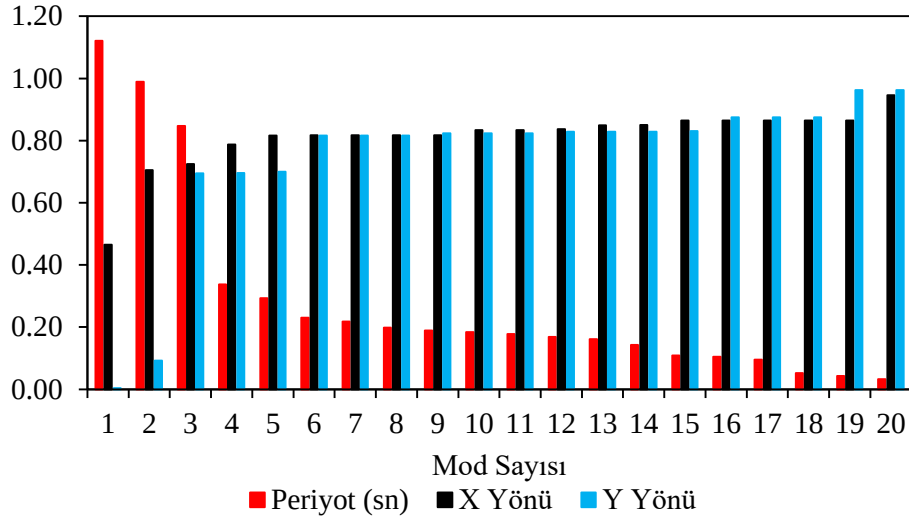
3.1. Giriş

Tez çalışmasının bu bölümünde, SAP2000 programında gerçekleştirilen analizler sonucunda yapının çarpışma etkisini dikkate alan ve almayan durumlar için taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, yer değiştirmeler, çarpışma kuvvetleri, burulma momentleri, görelî kat ötelemeler ve taşıyıcı sistem performans seviyeleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

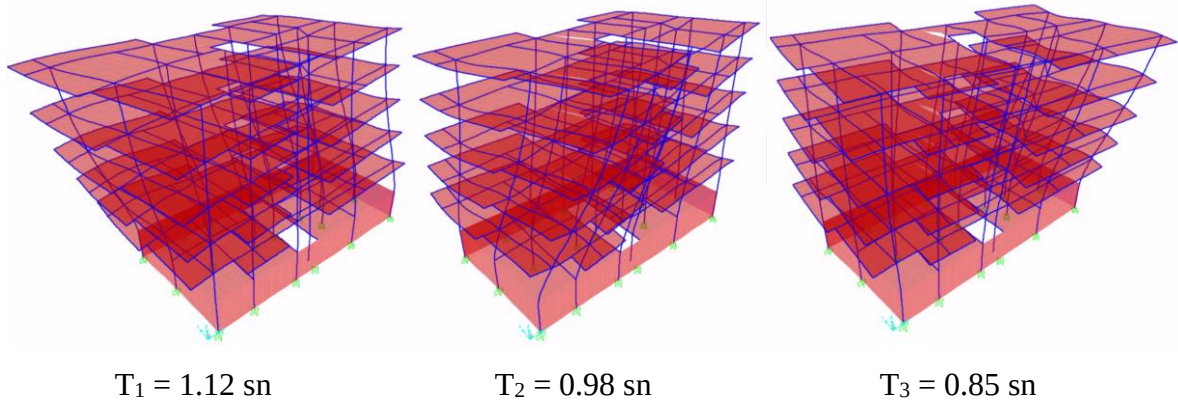
3.2. İncelenen Yapıya Ait Analiz Sonuçları

3.2.1. Modal Analiz Sonuçları

Yapının dinamik davranışını belirlemek amacıyla öncelikle modal analiz gerçekleştirilmiştir. Modal analiz sonucunda elde edilen doğal titreşim periyotları, mod şekilleri ve her bir moda karşılık gelen kütle katılım oranları değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, yapının ilk 20 modunun toplam kütle katılım oranı %95'in üzerine çıkmıştır. Bu nedenle, dinamik analizlerde 20 mod dikkate alınmıştır (Şekil 43). Elde edilen ilk üç mod şekli ve bunlara karşılık gelen periyotlar incelendiğinde; birinci modun x yönünde yatay öteleme, ikinci modun burulma modu, üçüncü modun ise y yönünde yatay öteleme olduğu belirlenmiştir. Bu modlara karşılık gelen doğal periyotlar sırasıyla 1.12 s, 0.98 s ve 0.85 s olarak elde edilmiştir. Şekil 44'te yapının ilk üç mod şekli ve doğal titreşim periyotları verilmiştir.



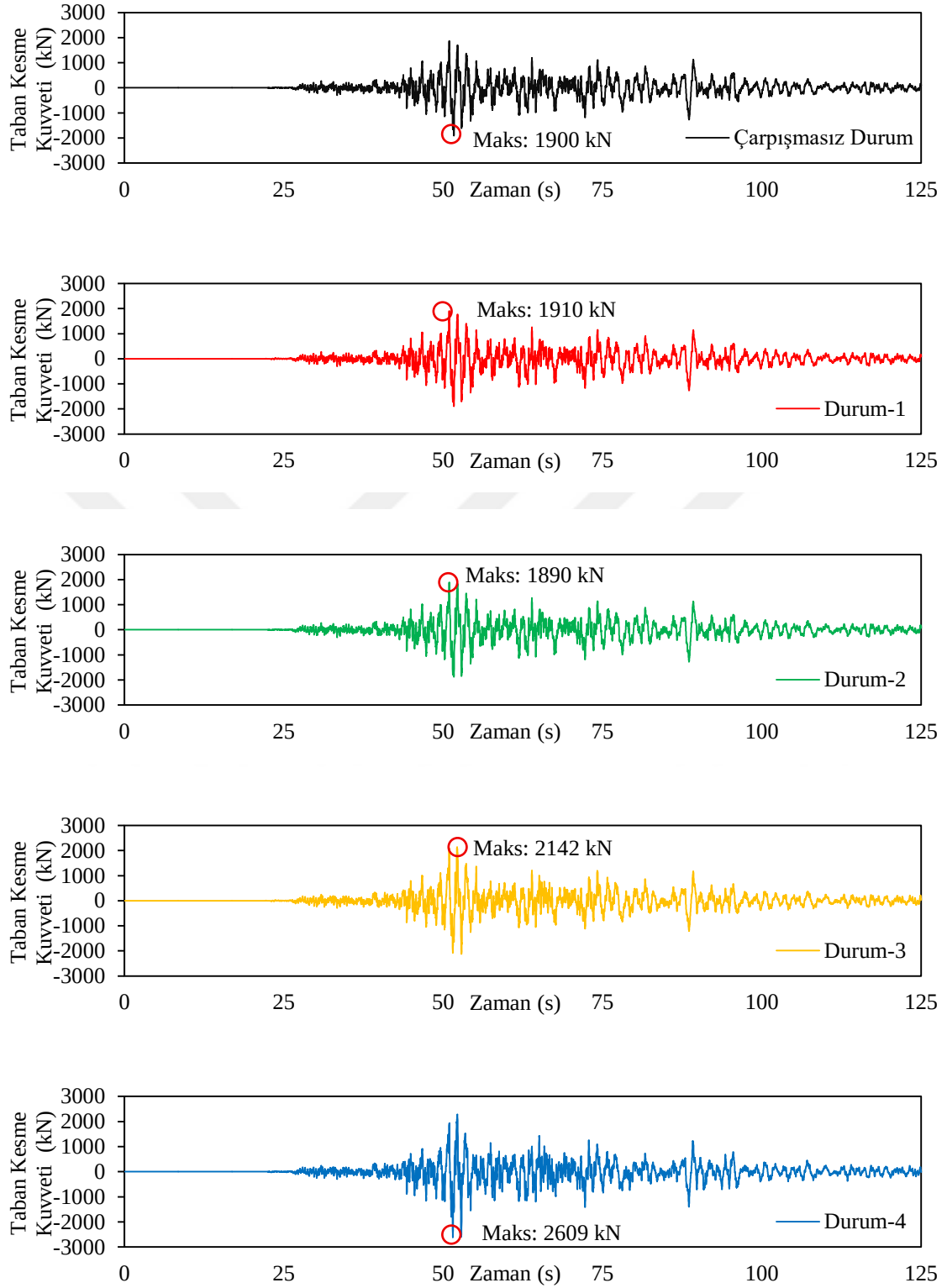
Şekil 43. Mod sayısına göre toplam kütle katılım oranları



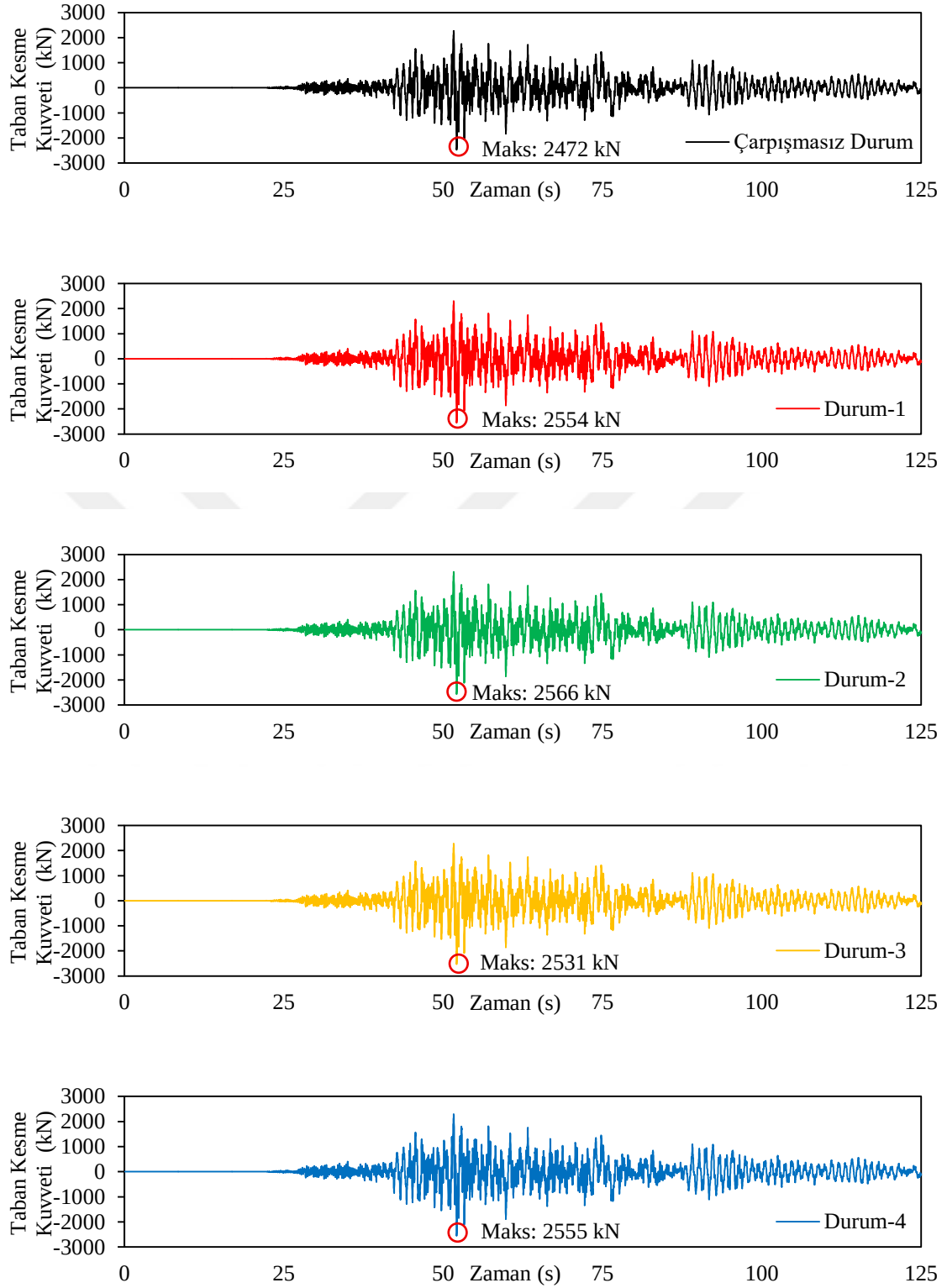
Şekil 44. İlk üç moda ait mod şekilleri ve doğal titreşim periyotları

3.2.2. Taban Kesme Kuvvetleri

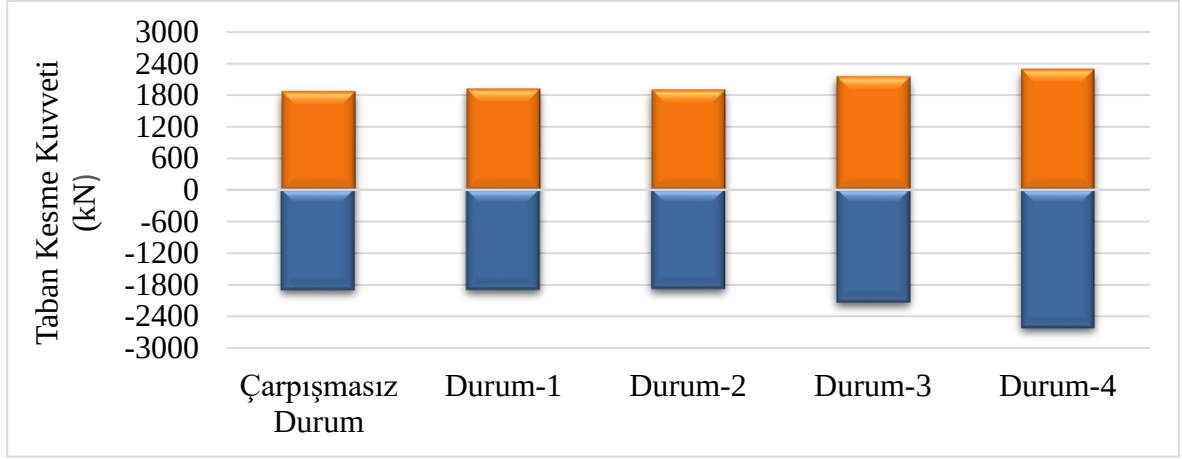
Analizler sonucunda, referans model olarak tanımlanan çarpışmasız durum ile çarpışmalı senaryolarda elde edilen taban kesme kuvvetlerinin zamana bağlı değişimleri ve maksimum taban kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Şekil 45 ve 46'da 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremine ait ivme kayıtları ile gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen taban kesme kuvveti grafikleri sunulmuştur. Şekil 47 ve 48'de ise maksimum taban kesme kuvvetleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremine ait taban kesme grafikleri ise Şekil 49-52'de sunulmuştur.



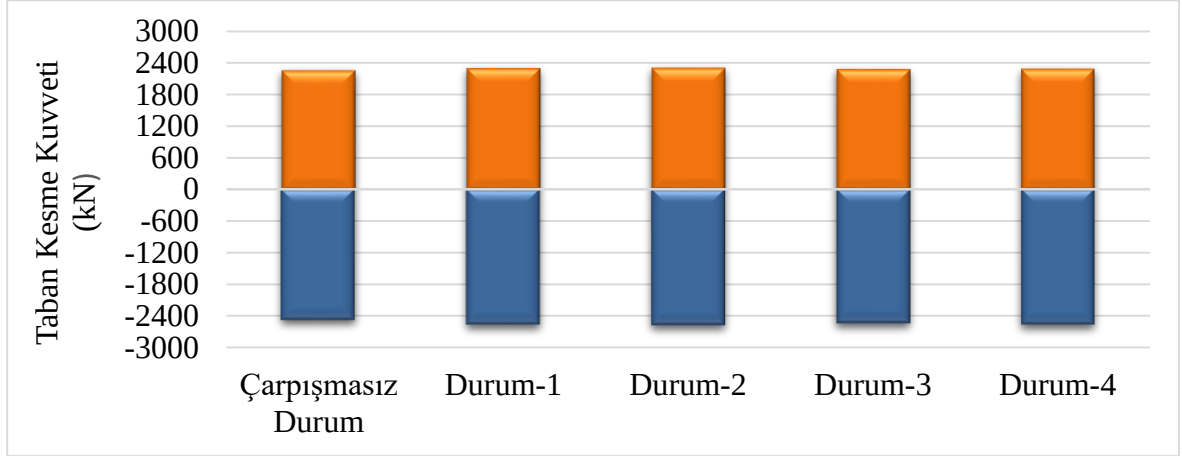
Şekil 45. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın x yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi



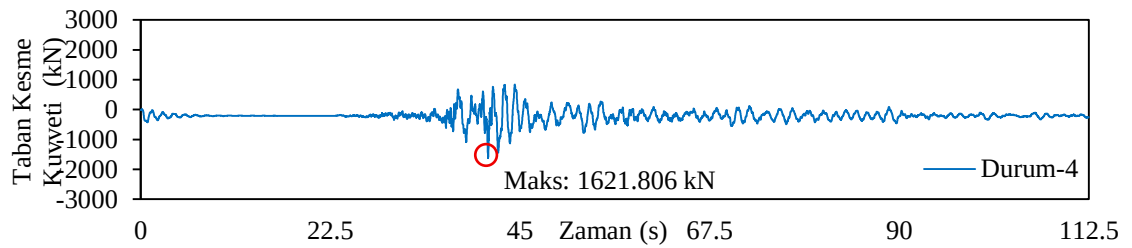
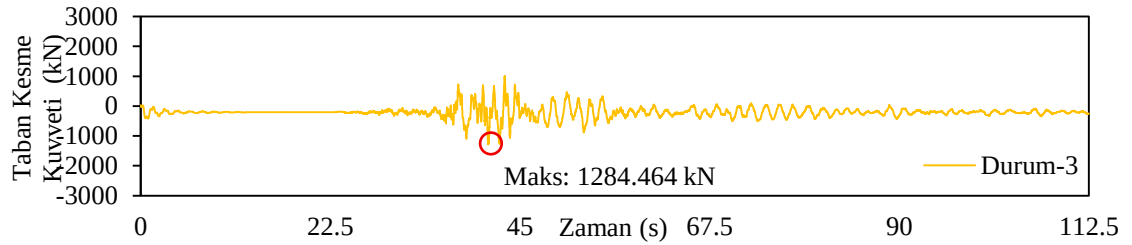
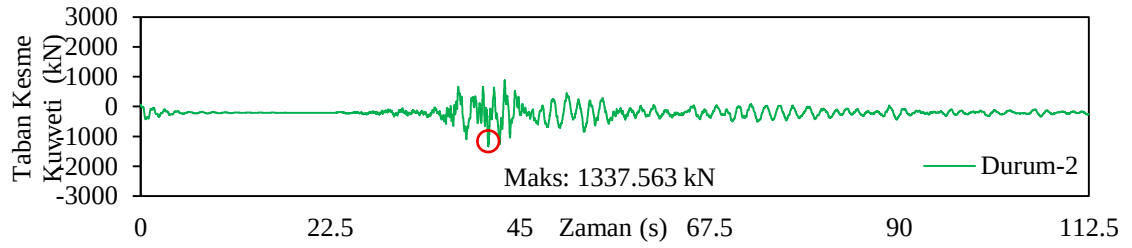
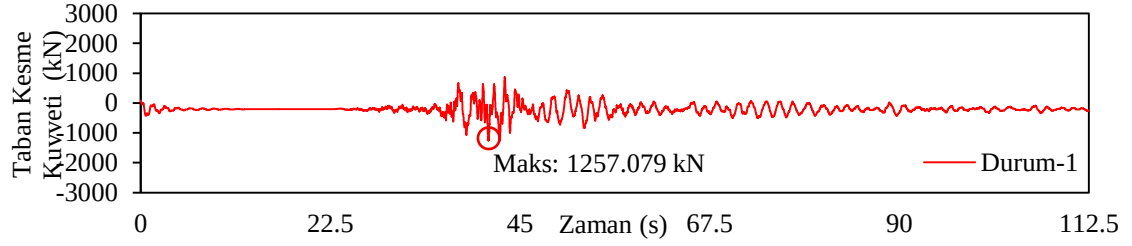
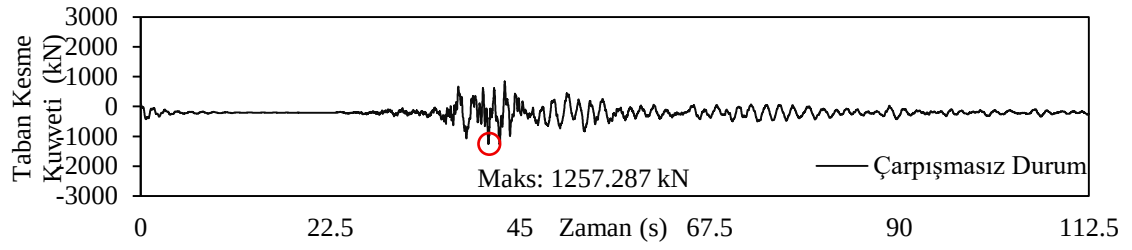
Şekil 46. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın y yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi



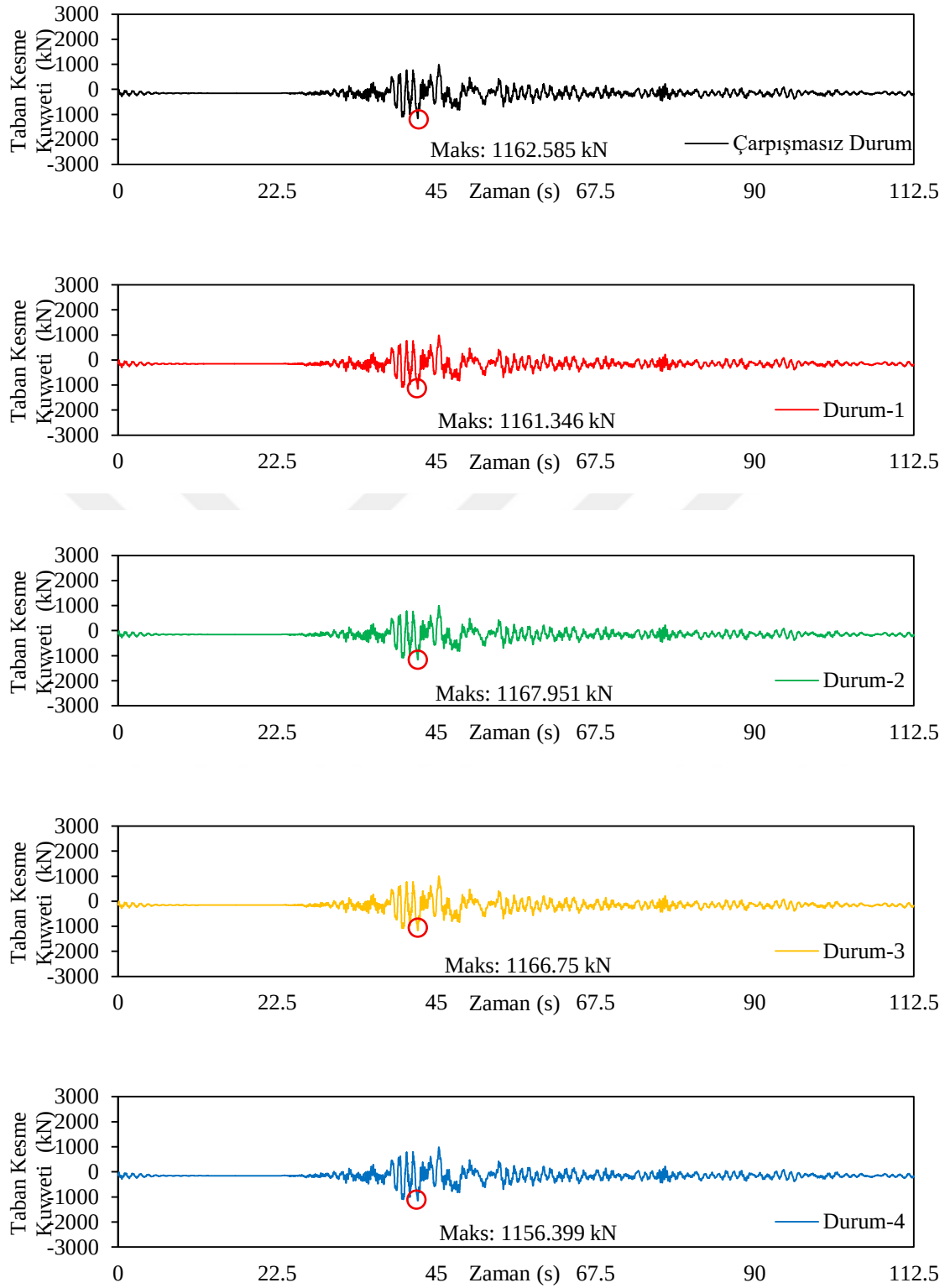
Şekil 47. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın x yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



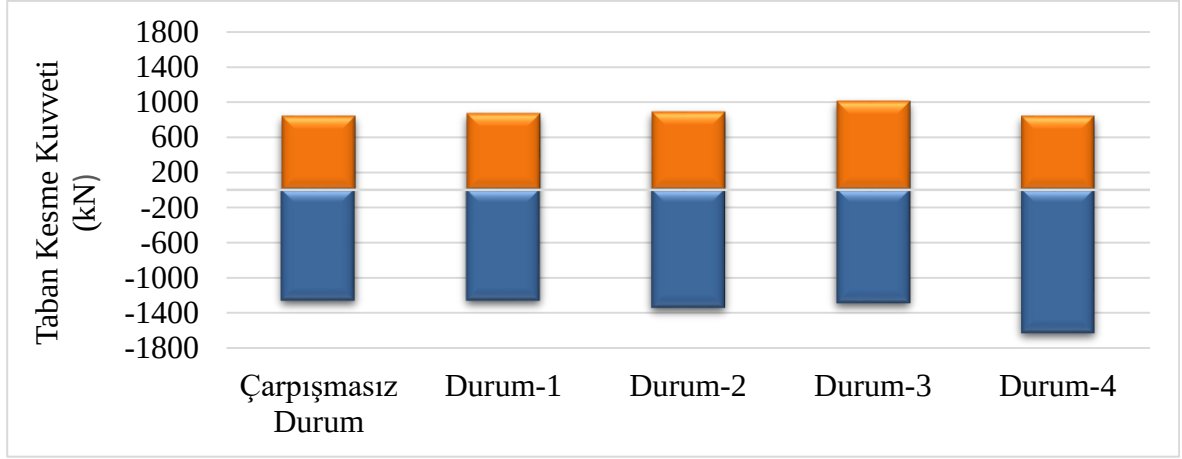
Şekil 48. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında binanın y yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması



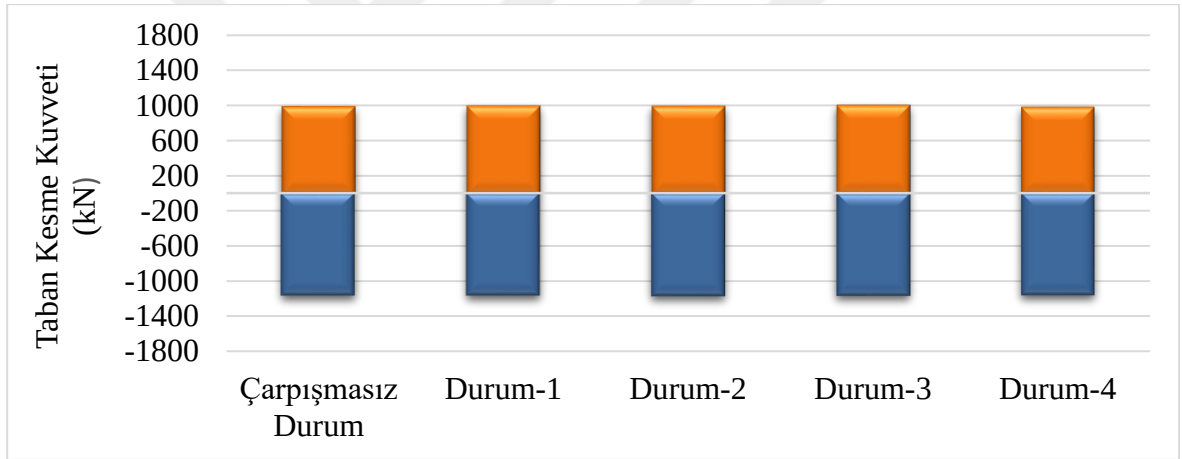
Şekil 49. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın x yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi



Şekil 50. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın y yönündeki taban kesme kuvvetlerinin zaman tanım alanındaki değişimi



Şekil 51. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın x yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

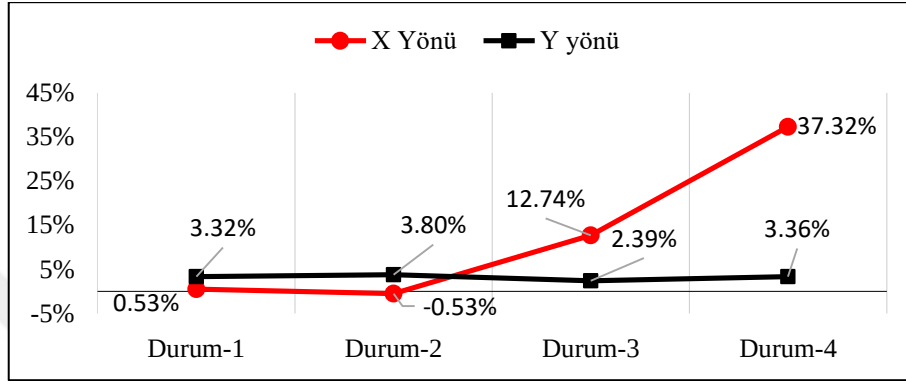


Şekil 52. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında binanın y yönündeki en büyük taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

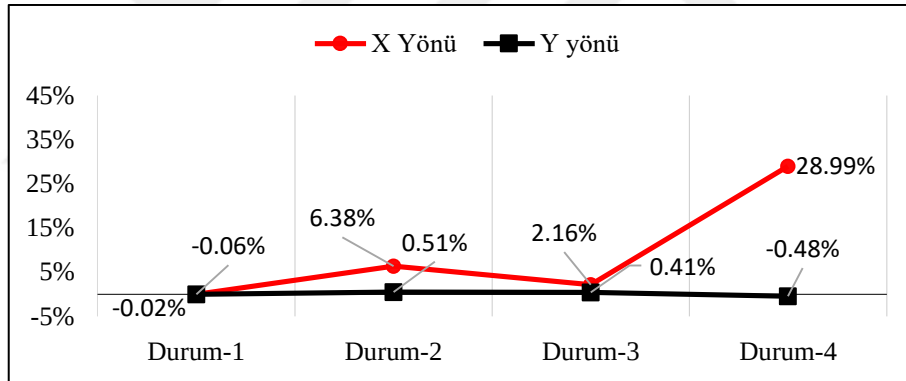
Şekil 45-48 incelendiğinde, 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x yönünde elde edilen maksimum taban kesme kuvveti çarpışmasız durumda 1900 kN iken, çarpışma etkilerinin dikkate alındığı senaryoları olan Durum-1, Durum-2, Durum-3 ve Durum-4 için sırasıyla 1910 kN, 1890 kN, 2142 kN ve 2609 kN olarak elde edilmiştir. Y yönünde ise bu değerler sırasıyla 2472 kN, 2554 kN, 2566 kN, 2531 kN ve 2555 kN olarak elde edilmiştir.

Şekil 49–52’de göre, 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında, x yönündeki taban kesme kuvvetleri çarpışmasız durumdan başlayarak sırasıyla 1257.287 kN, 1257.079

kN, 1337.563 kN, 1284.464 kN ve 1621.806 kN; y yönündeki kuvvetler ise 1162 kN, 1161.346 kN, 1167.951 kN, 1166.750 kN ve 1156.399 kN olarak elde edilmiştir. Tez çalışması kapsamında dikkate alınan çarpışma senaryolarında elde edilen en büyük taban kesme kuvvetlerinin, çarpışmasız durumdaki taban kesme kuvvetleri ile karşılaştırılması sonucunda meydana gelen yüzdesel değişimler Şekil 53'te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 53. Çarpışma senaryolarında, çarpışmasız duruma kıyasla en büyük taban kesme kuvvetlerindeki yüzdesel değişimler (a. Pazarcık depremi, b. Elbistan depremi)

2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi dikkate alındığında, x yönünde Durum-2'deki taban kesme kuvveti çarpışmasız duruma göre yaklaşık %0.53 oranında azalmış olsa da Durum-1'de %0.53, Durum-3'te %12.74 ve Durum-4'te %37.32 oranında artış gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Durum-3 ve Durum-4'te dikkate alınan döşeme seviyesi çarpışmalarının taban kesme kuvveti açısından daha kritik etkiler doğurduğunu göstermektedir. Y yönünde ise taban kesme kuvvetleri, Durum-1, Durum-2, Durum-3 ve Durum-4 için sırasıyla %3.32, %3.80, %2.39 ve %3.36 oranında artış göstermiştir. Bu veriler 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi açısından değerlendirildiğinde; y yönünde Durum-

1’de çarpışmasız duruma kıyasla taban kesme kuvvetlerinin neredeyse aynı kaldığı, Durum-2’de %6.38, Durum-3’te %2.16 ve Durum-4’te ise %29 oranında artış meydana geldiği görülmektedir. Y yönünde ise Durum-1 ve Durum-4’te sırasıyla %0.06 ve %0.48 azalma; Durum-2 ve Durum-3’te ise %0.51 ve %0.41 oranında artış tespit edilmiştir. Çarpışma etkisinin yalnızca x yönünde meydana gelmesi nedeniyle, her iki deprem kaydında da y yönündeki taban kesme kuvvetlerinde belirgin bir değişim oluşmadığı görülmektedir.

3.2.3. Kat İvmeleri ve Çarpışma Kuvvetleri

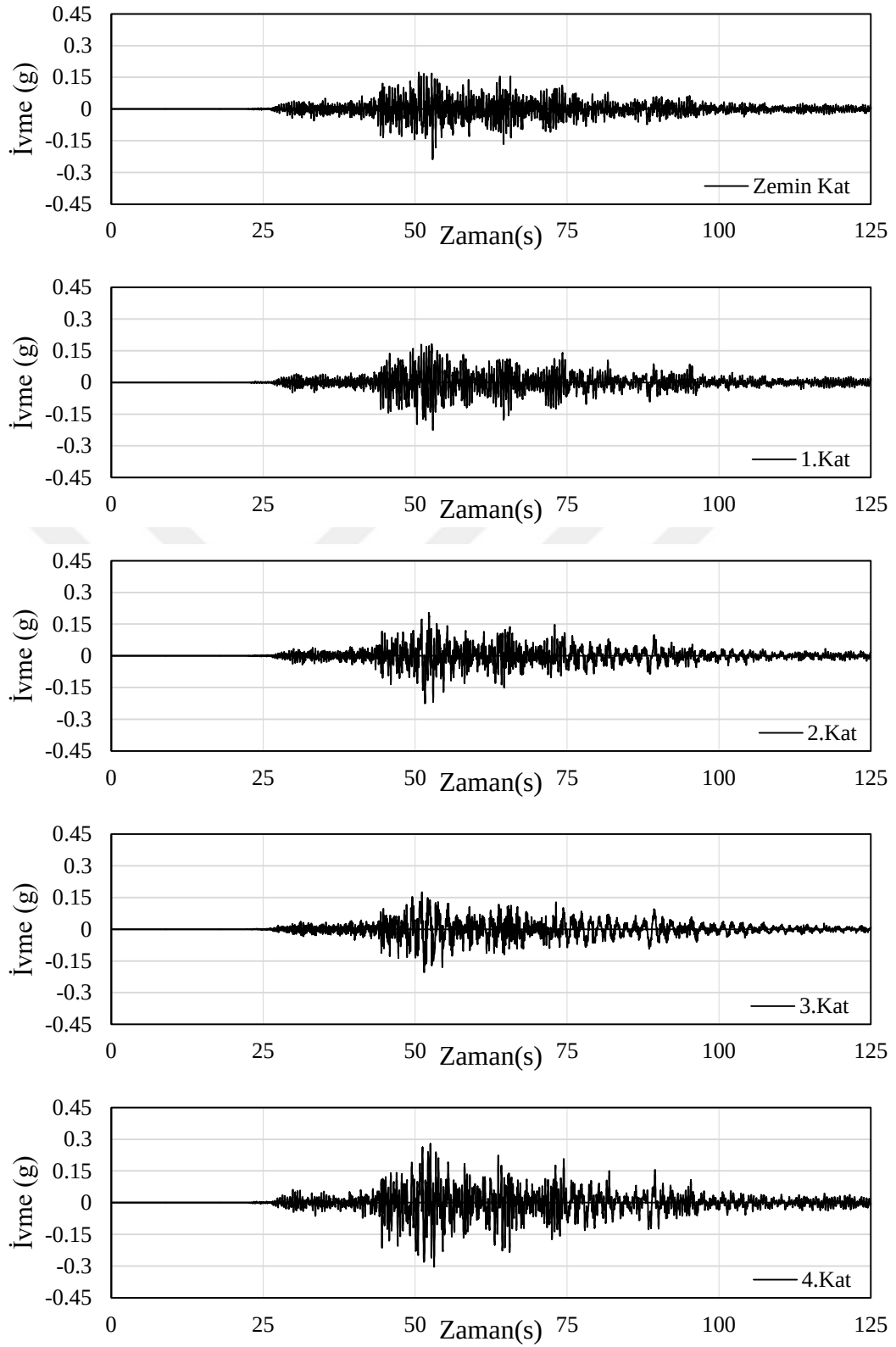
Şekil 54–59’da 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x yönünde elde edilen kat kesme kuvvetleri sunulmuştur. Y yönünde her bir kattan elde edilen ivme-zaman grafikleri Şekil 60–63’te verilmiştir. En büyük kat ivmesi değerlerinin bina yüksekliği boyunca değişimi ise Şekil 64 ve 65’te sunulmuştur. 2023 Kahramanmaraş–Elbistan depremi etkisi altında x doğrultusundaki kat ivmelerinin dağılımları Şekil 66-70’te sunulmaktadır. Y doğrultusunda her kat için elde edilen ivme–zaman ilişkileri Şekil 71-75’te gösterilmiştir. Katlardaki maksimum ivme değerlerinin bina yüksekliği boyunca değişimi ise Şekil 76 ve 77’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 3 ve Tablo 4 çarpışmasız duruma kıyasla kat ivme değerlerinde meydana gelen değişimleri sunmaktadır. Görüleceği üzere çarpışma etkileri deprem karakteristiğine bağlı olarak yapısal tepkileri önemli ölçüde değiştirmektedir. 2023 Kahramanmaraş–Pazarcık depremi altında çarpışmanın gerçekleştiği doğrultu olan x doğrultusunda çarpışma kaynaklı ivme artışları tüm senaryolarda belirgin seviyelere ulaşmış olup, özellikle döşeme seviyesinde çarpışmaların dikkate alındığı Durum-3 ve Durum-4 senaryolarında kritik düzeylere ulaştığı görülmektedir. Yapının her iki taraftan döşeme seviyesinde çarpışmaya maruz kaldığı düşünülen senaryo Durum-4’te bazı katlarda en büyük ivme değerleri %80’in üzerinde artışlar göstermiş olup lokal olarak kritik ivme büyütmelerine yol açtığı görülmüştür. Öte yandan, çarpışmanın gerçekleşmediği y yönünde ise kat ivmelerinde meydana gelen ivme değişimlerinin çarpışmanın meydana geldiği x doğrultusuna kıyasla sınırlı kaldığı tespit edilmiştir. 2023 Kahramanmaraş–Elbistan depremi altında ise x yönündeki ivme değişimleri, dikkate alınan çarpışma durumuna göre farklı dalgalanmalar göstermiş olup, özellikle Durum-3’te ivmelerde artışlar belirgin olmuştur. Buna karşılık çarpışmanın olmadığı yönde ivmelerde genel olarak azalmalar gözlemlenmiştir.

Tablo 3. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız duruma kıyasla kat ivmelerinde meydana gelen değişimler

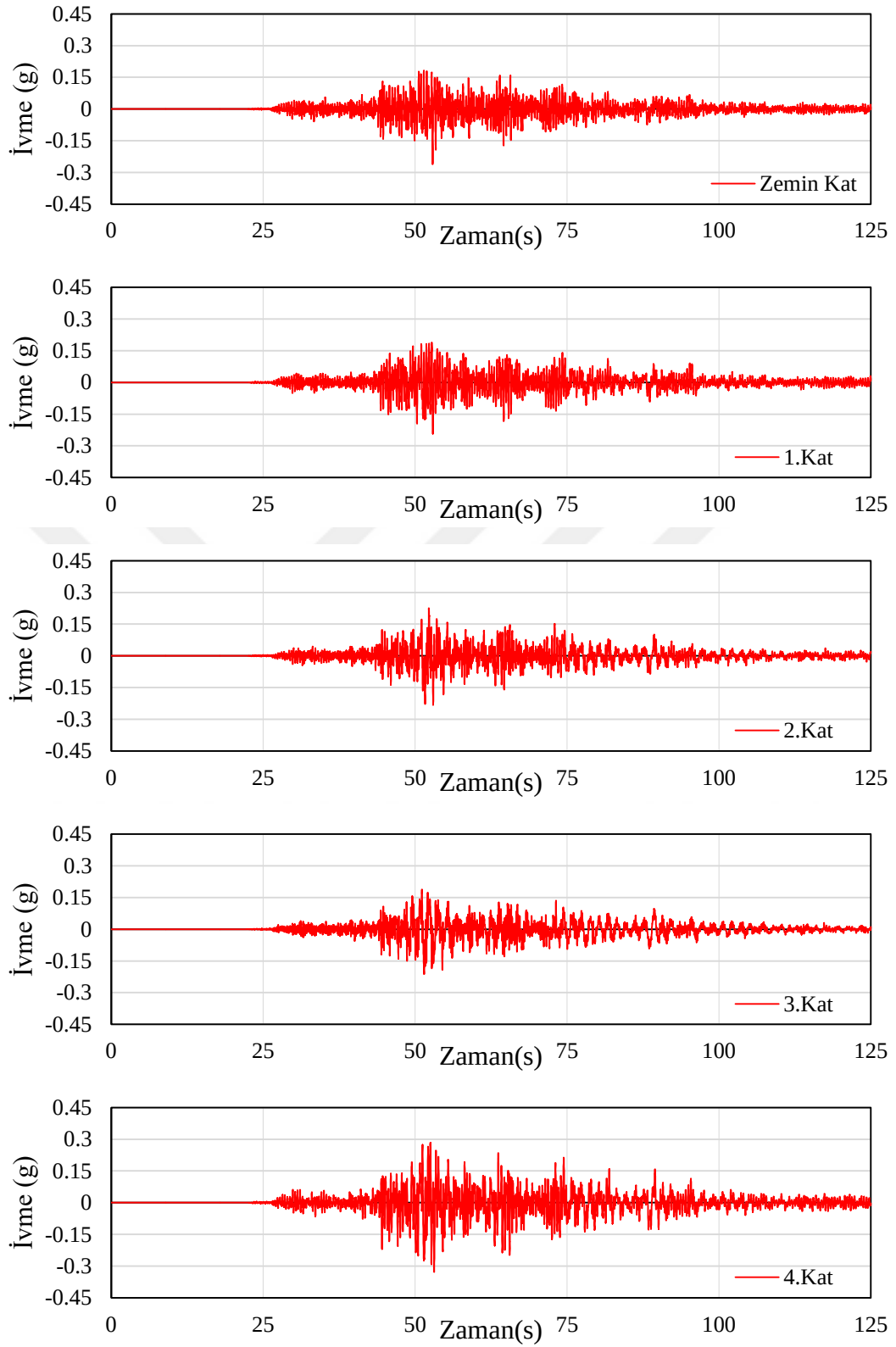
x doğrultusu (çarpışma doğrultusu)					
	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Durum-1	9.41%	7.75%	10.74%	7.51%	8.03%
Durum-2	15.85%	15.97%	12.82%	7.38%	14.46%
Durum-3	32.71%	16.49%	50.16%	20.53%	23.32%
Durum-4	31.44%	67.83%	48.48%	83.83%	42.45%
y doğrultusu (serbest yön)					
	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Durum-1	6.74%	6.93%	3.20%	8.96%	4.26%
Durum-2	3.29%	5.95%	5.79%	10.37%	2.43%
Durum-3	8.57%	2.82%	14.26%	12.53%	-5.07%
Durum-4	14.32%	10.70%	27.44%	14.89%	3.13%

Tablo 4. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız duruma kıyasla kat ivmelerinde meydana gelen değişimler

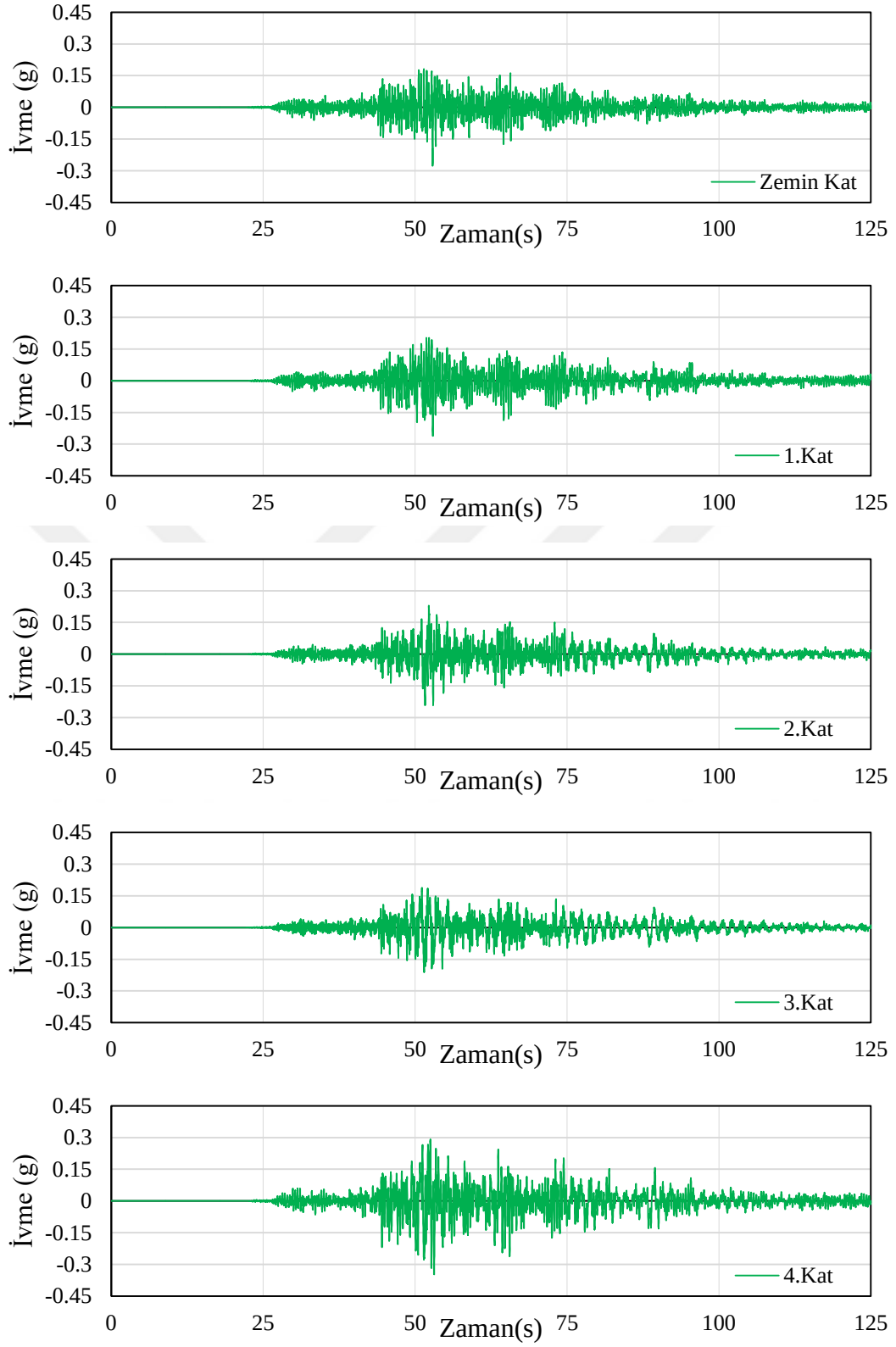
x doğrultusu (çarpışma doğrultusu)					
	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Durum-1	-1.85%	0.71%	1.70%	1.64%	-1.46%
Durum-2	3.16%	-5.46%	1.57%	9.56%	-8.35%
Durum-3	21.23%	11.84%	16.81%	2.91%	5.44%
Durum-4	4.30%	-20.46%	14.19%	17.53%	-19.44%
y doğrultusu (serbest yön)					
	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Durum-1	-1.22%	-1.28%	0.75%	1.10%	-1.35%
Durum-2	-2.93%	-4.29%	-3.73%	3.08%	-5.34%
Durum-3	9.43%	-5.67%	-6.04%	-3.60%	-7.29%
Durum-4	-30.32%	-21.44%	-24.85%	-16.21%	-25.69%



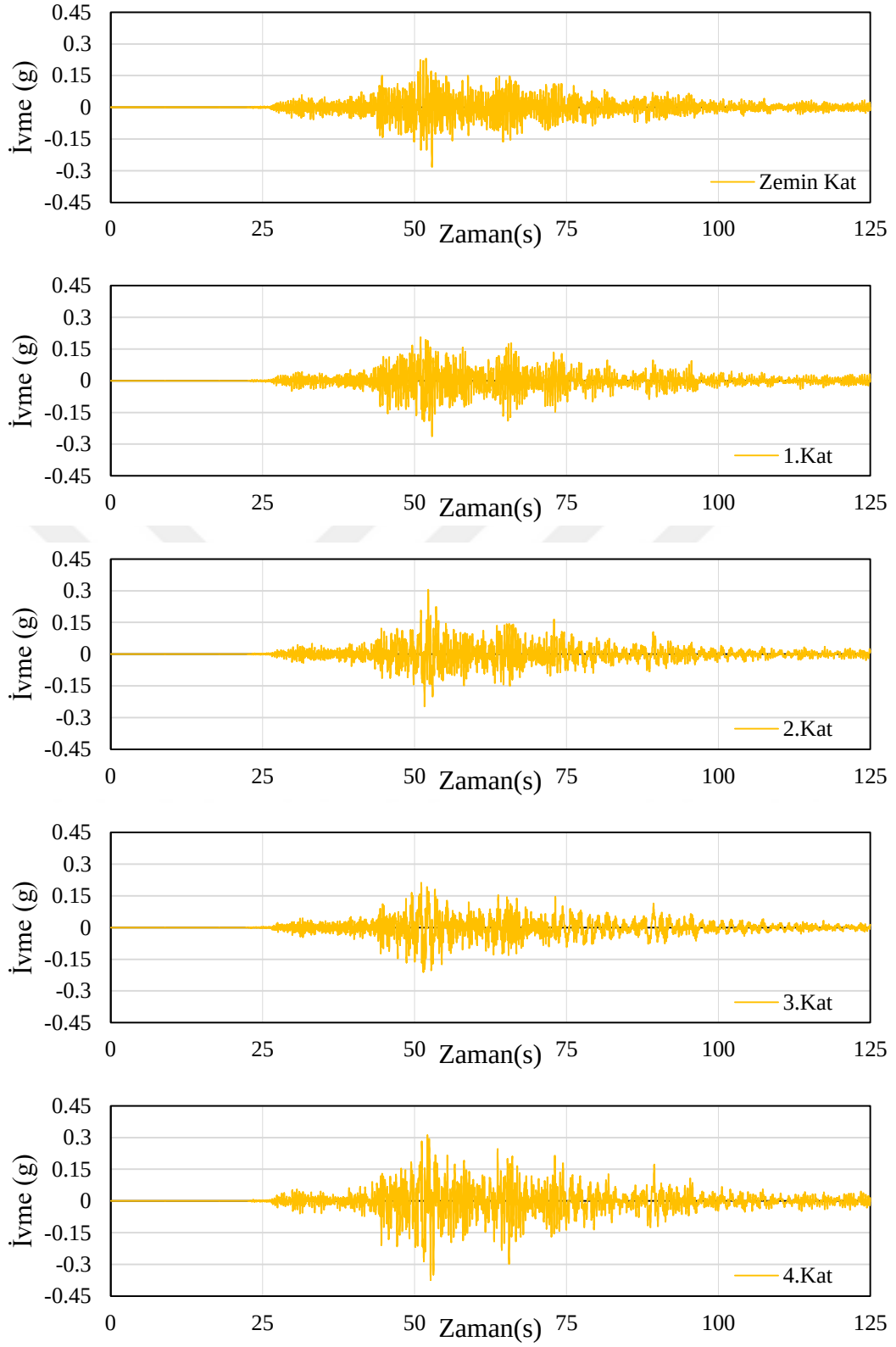
Şekil 54. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



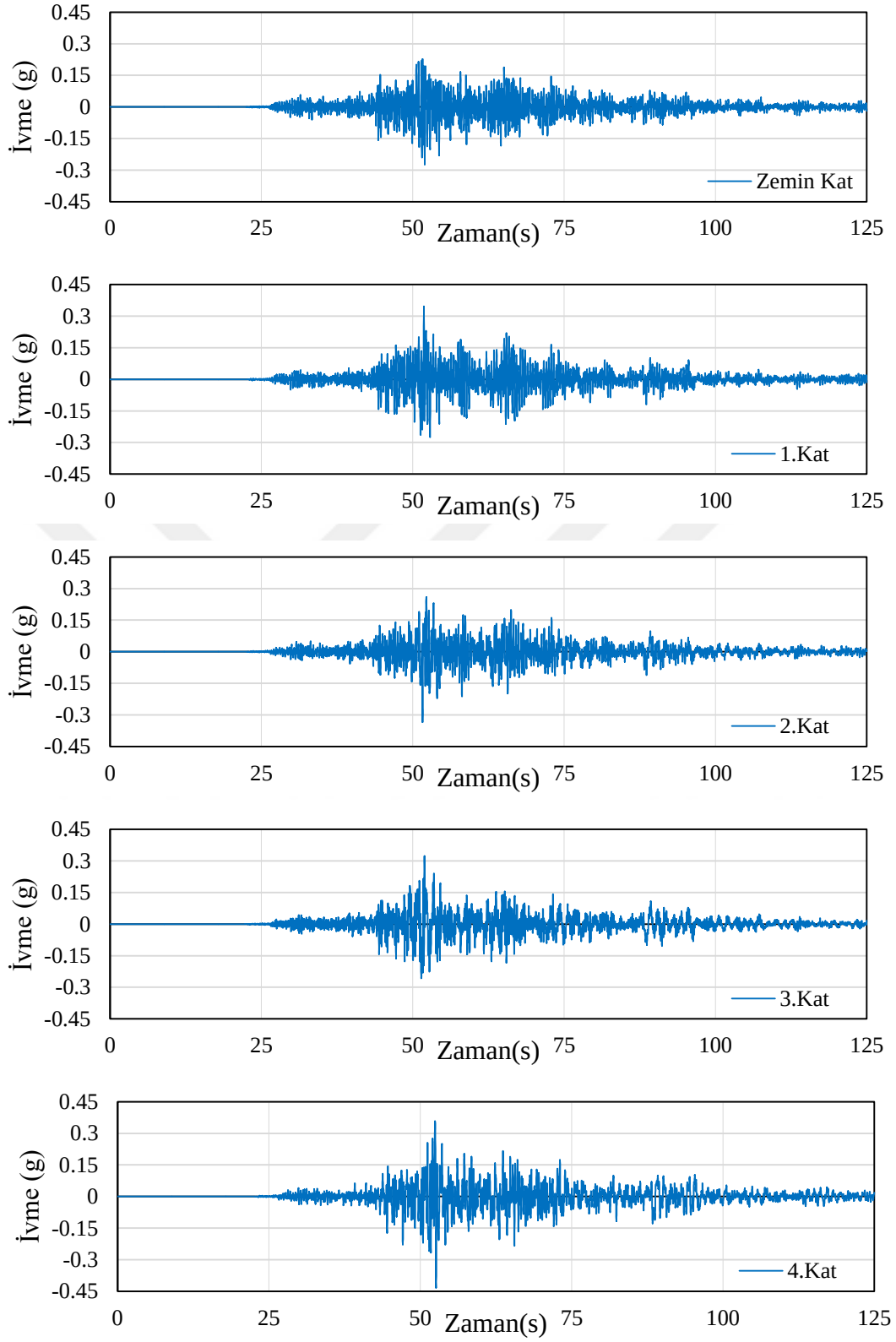
Şekil 55. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



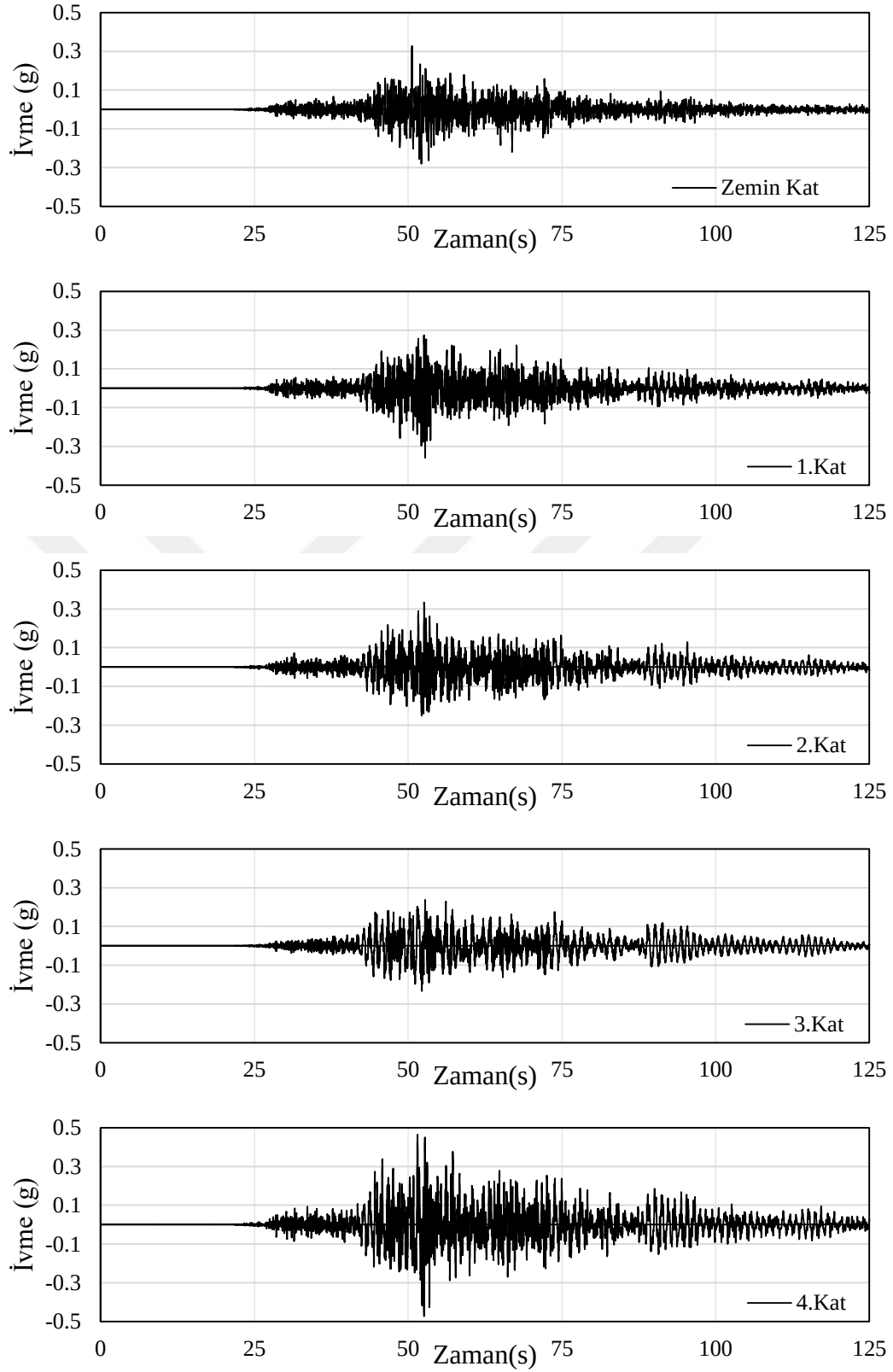
Şekil 56. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



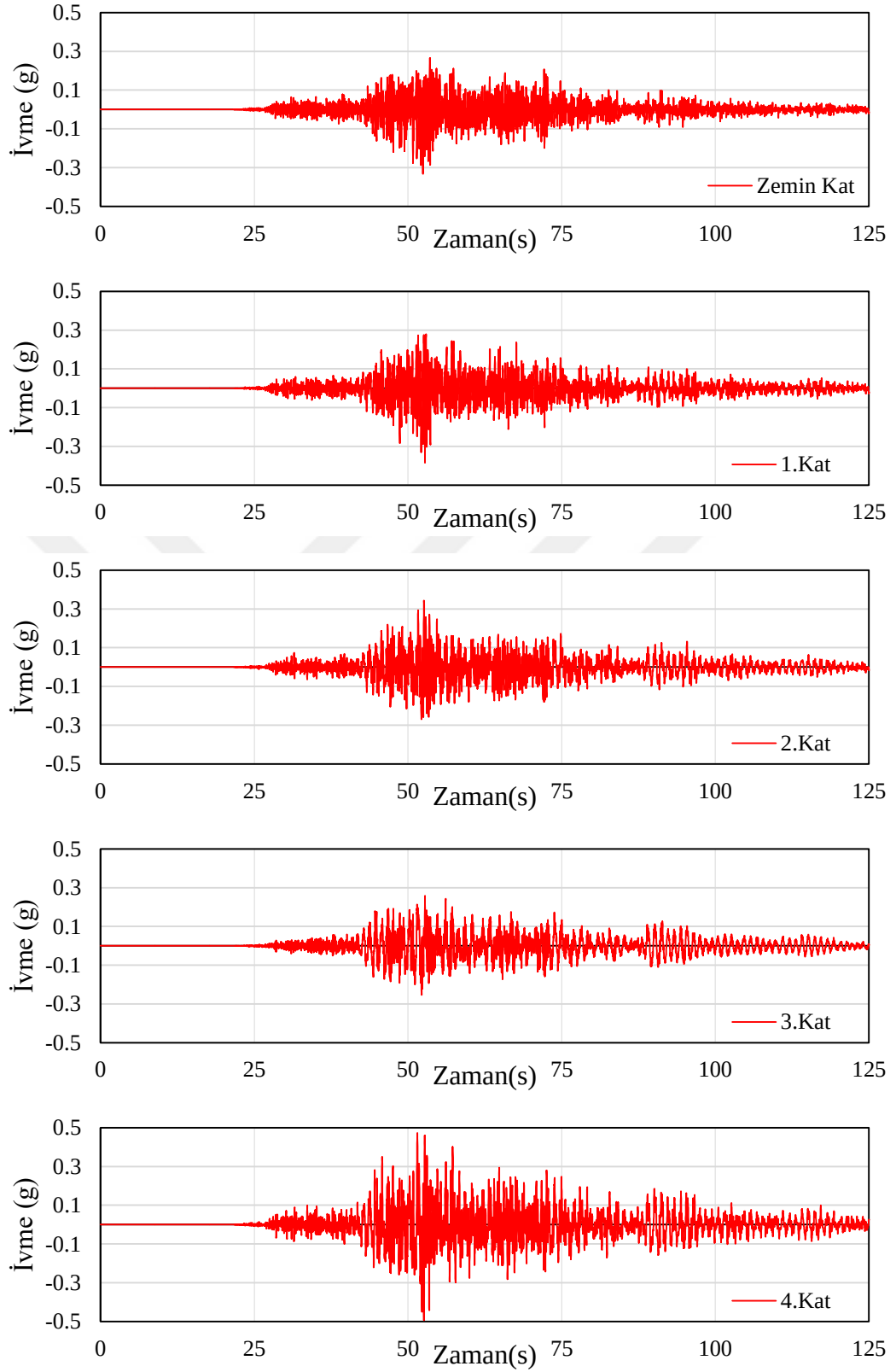
Şekil 57. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



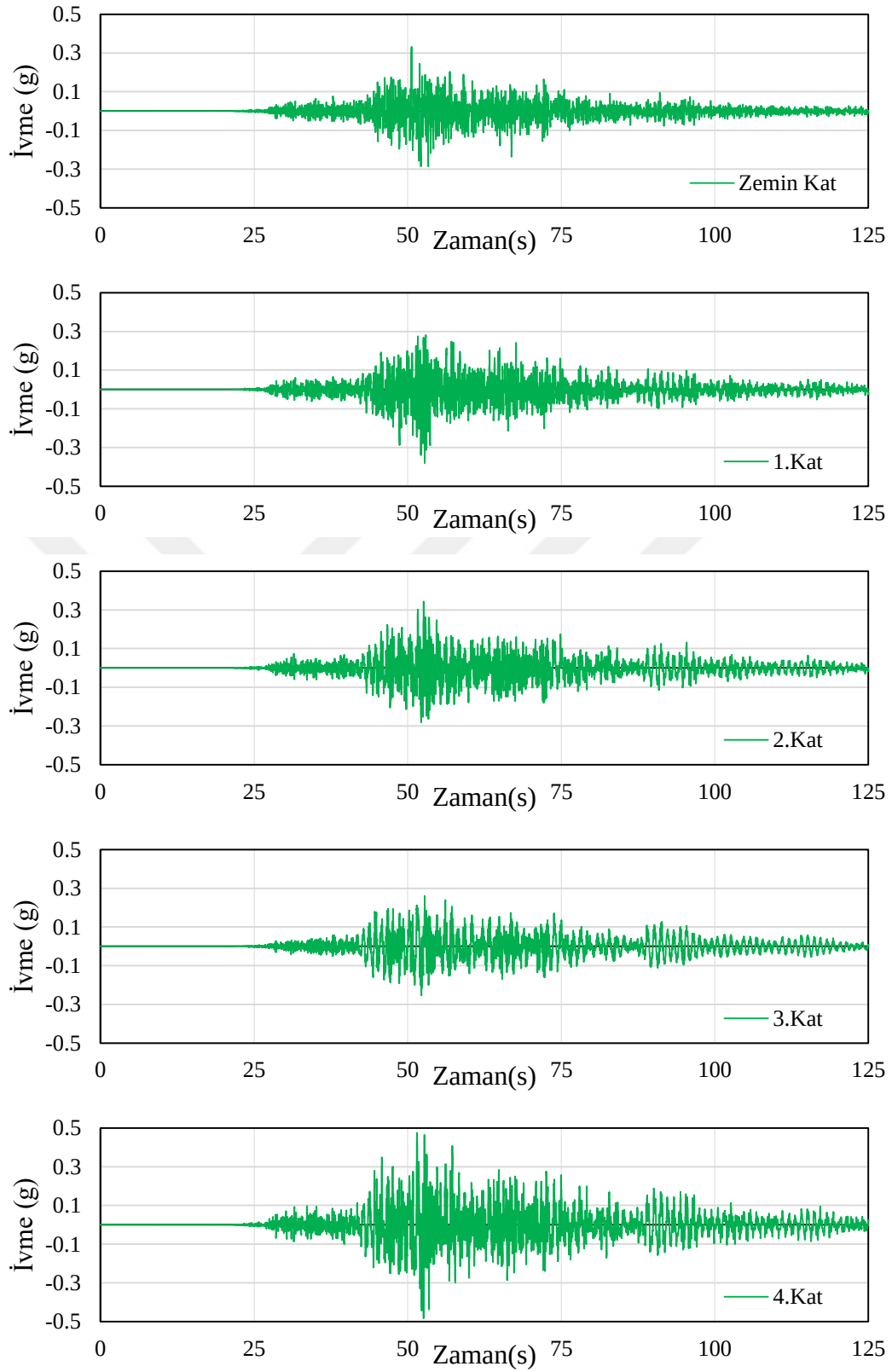
Şekil 58. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



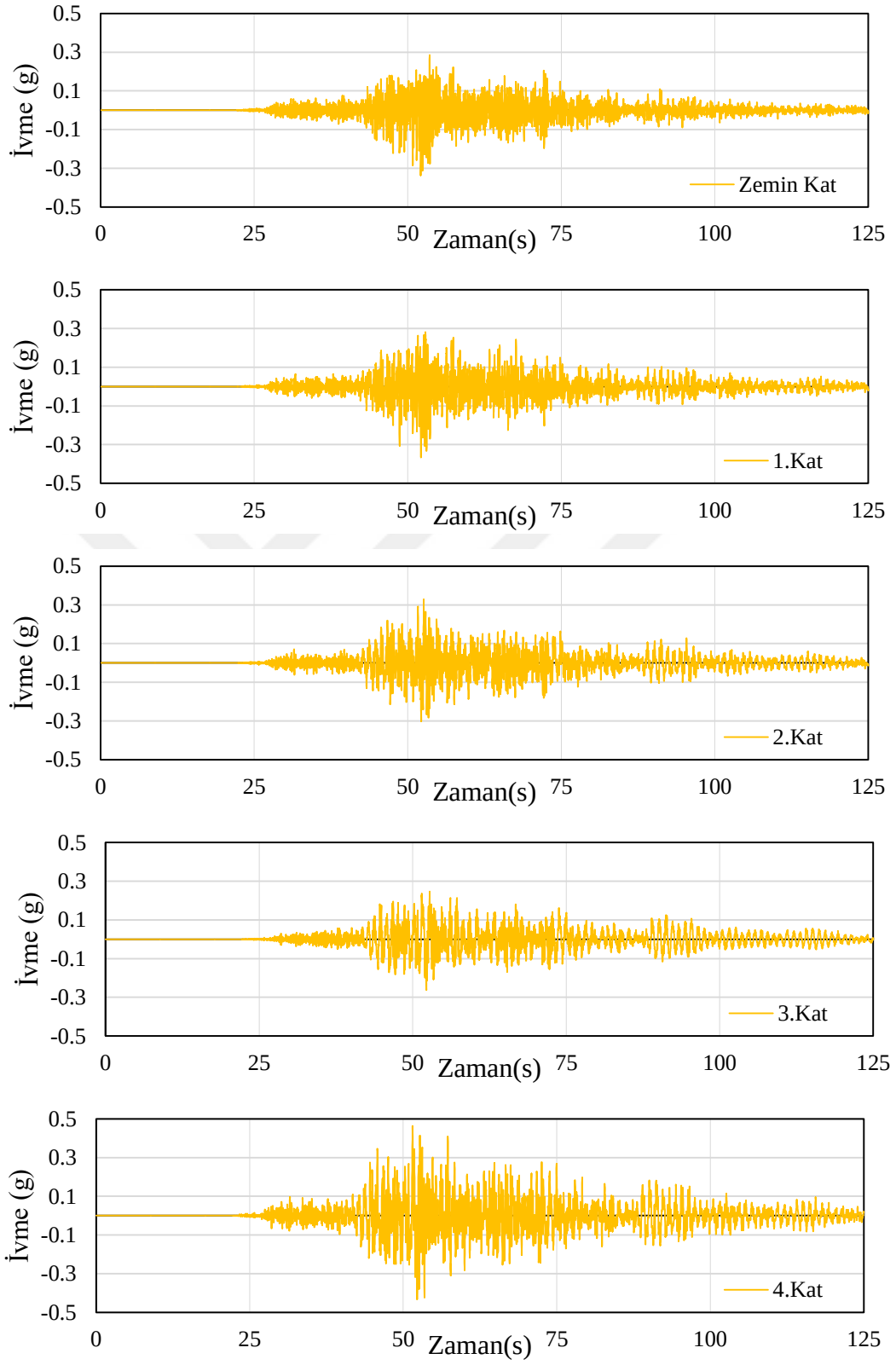
Şekil 59. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



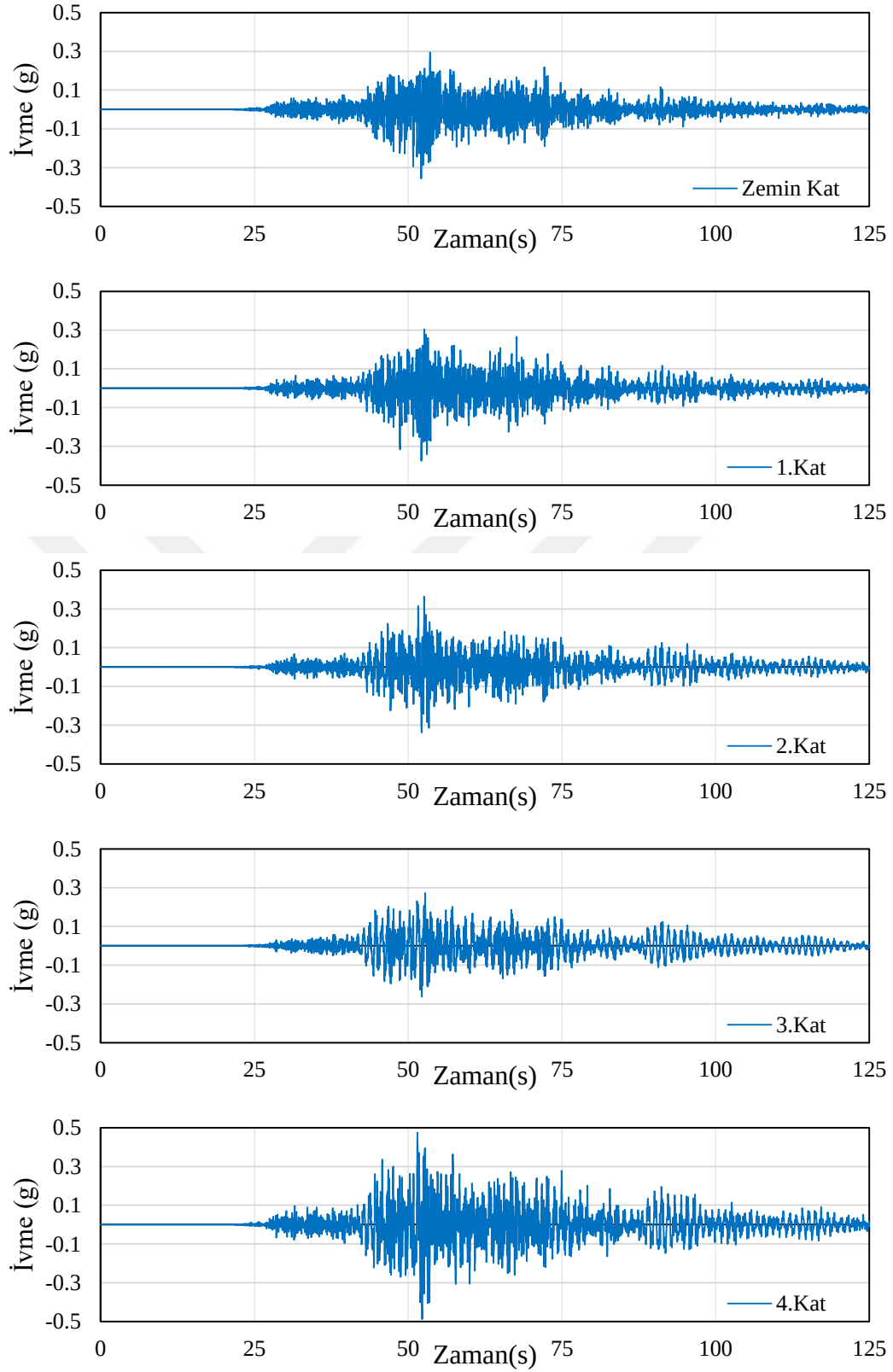
Şekil 60. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



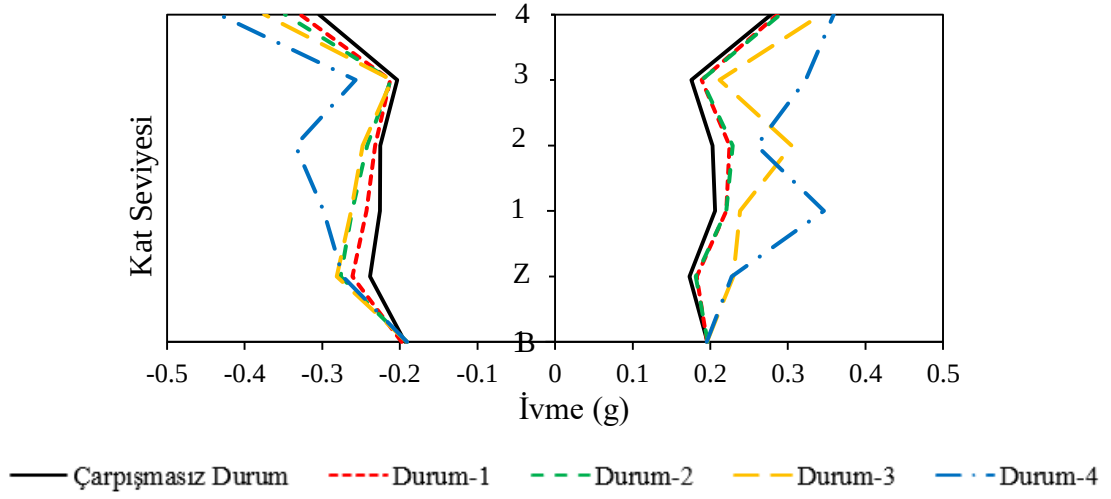
Şekil 61. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



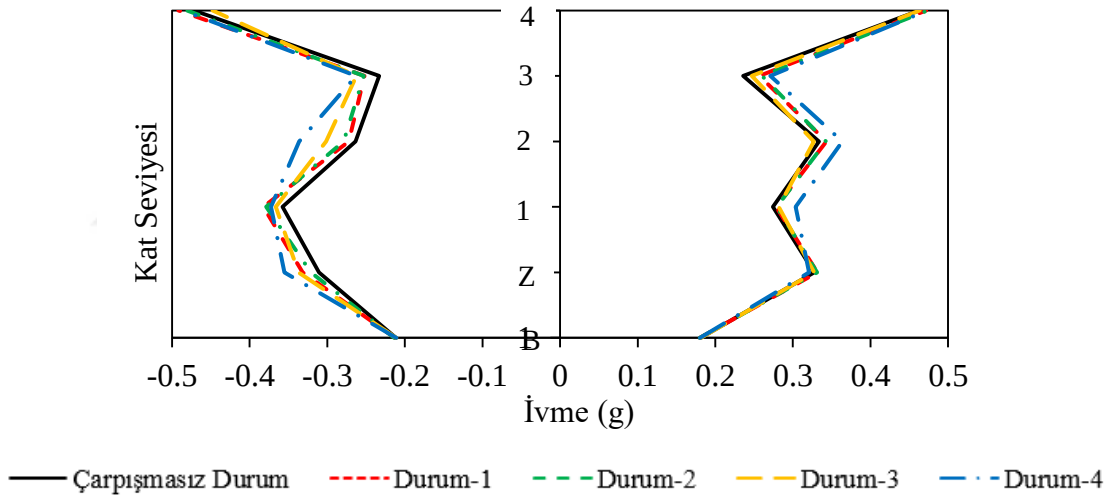
Şekil 62. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



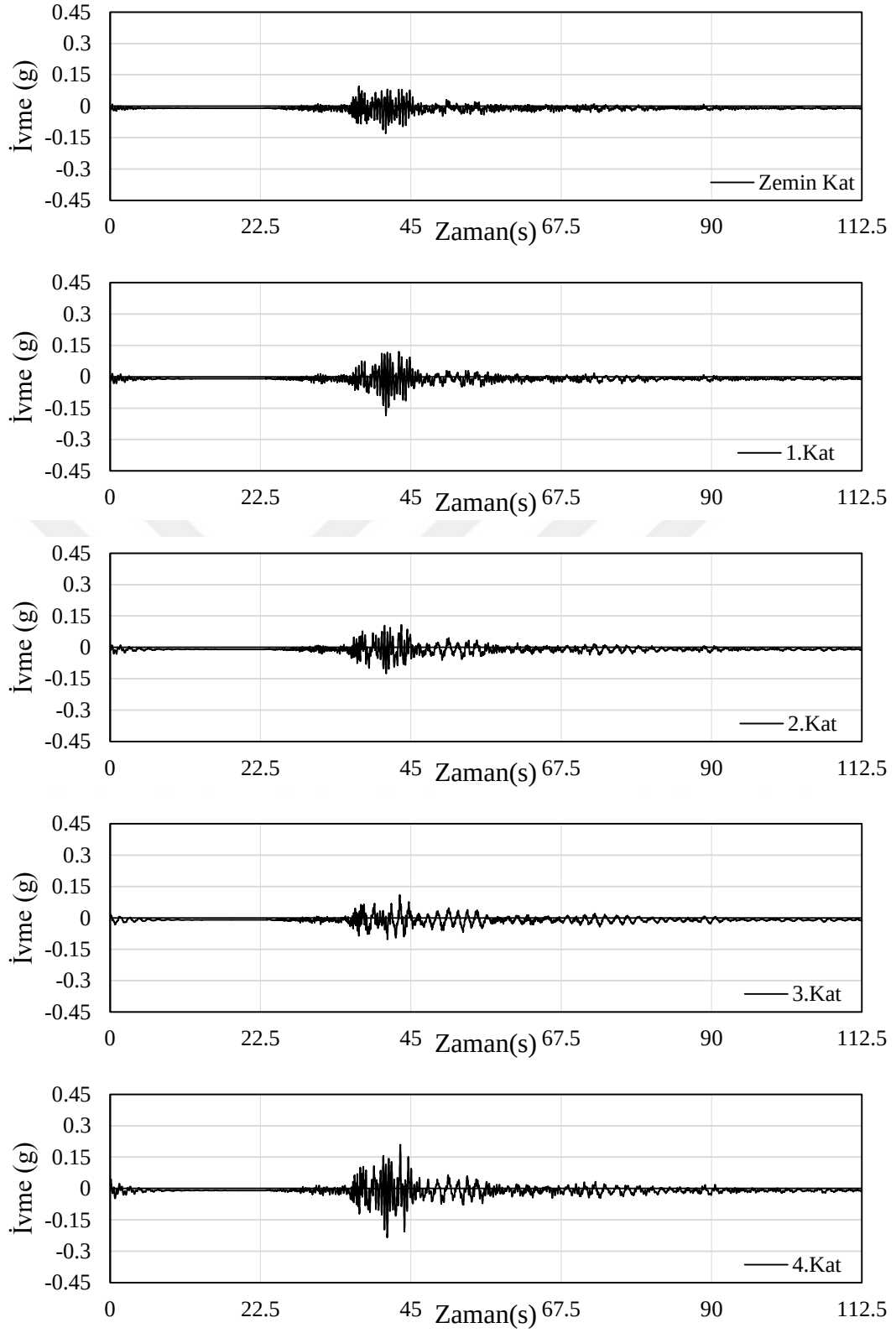
Şekil 63. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



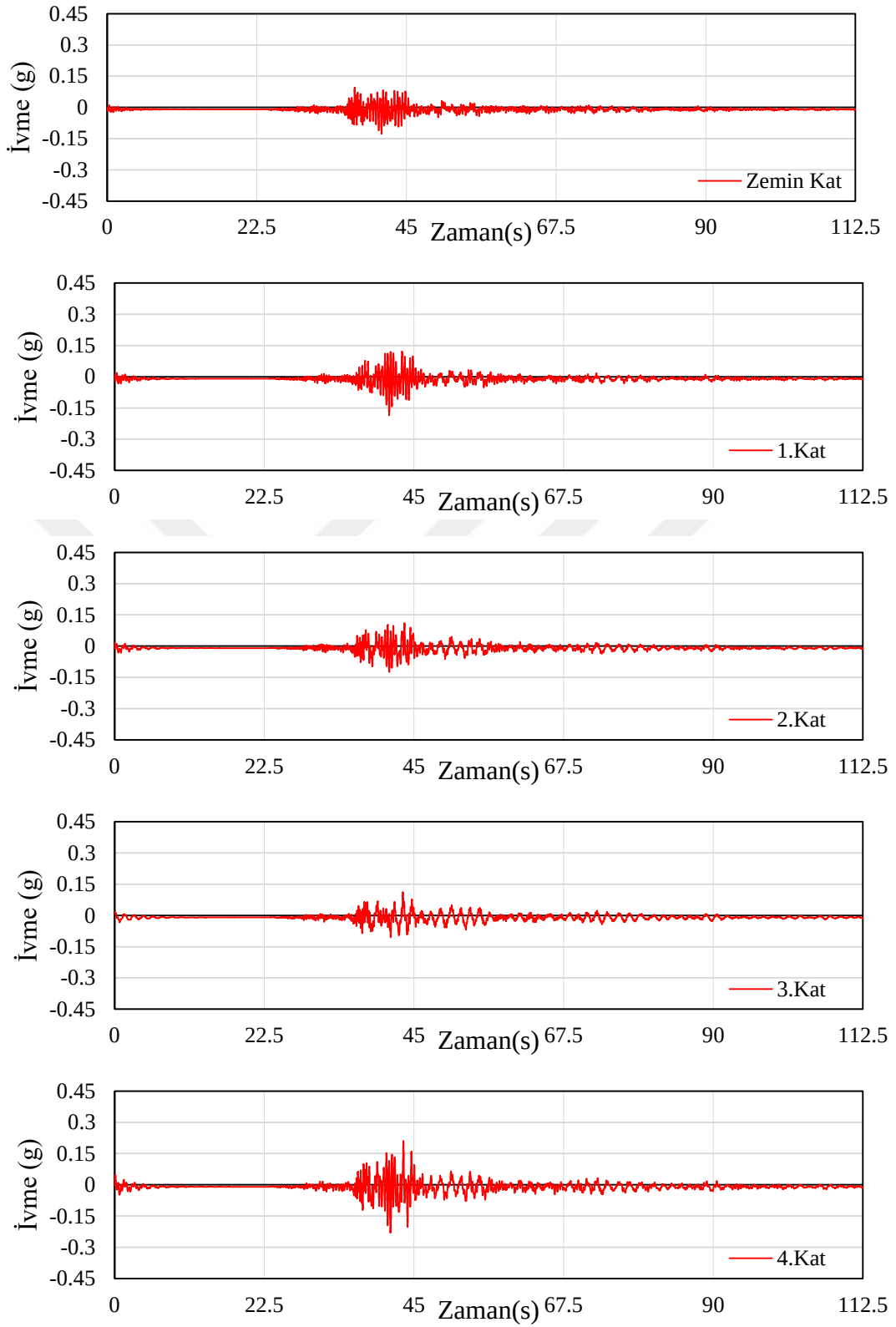
Şekil 64. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi



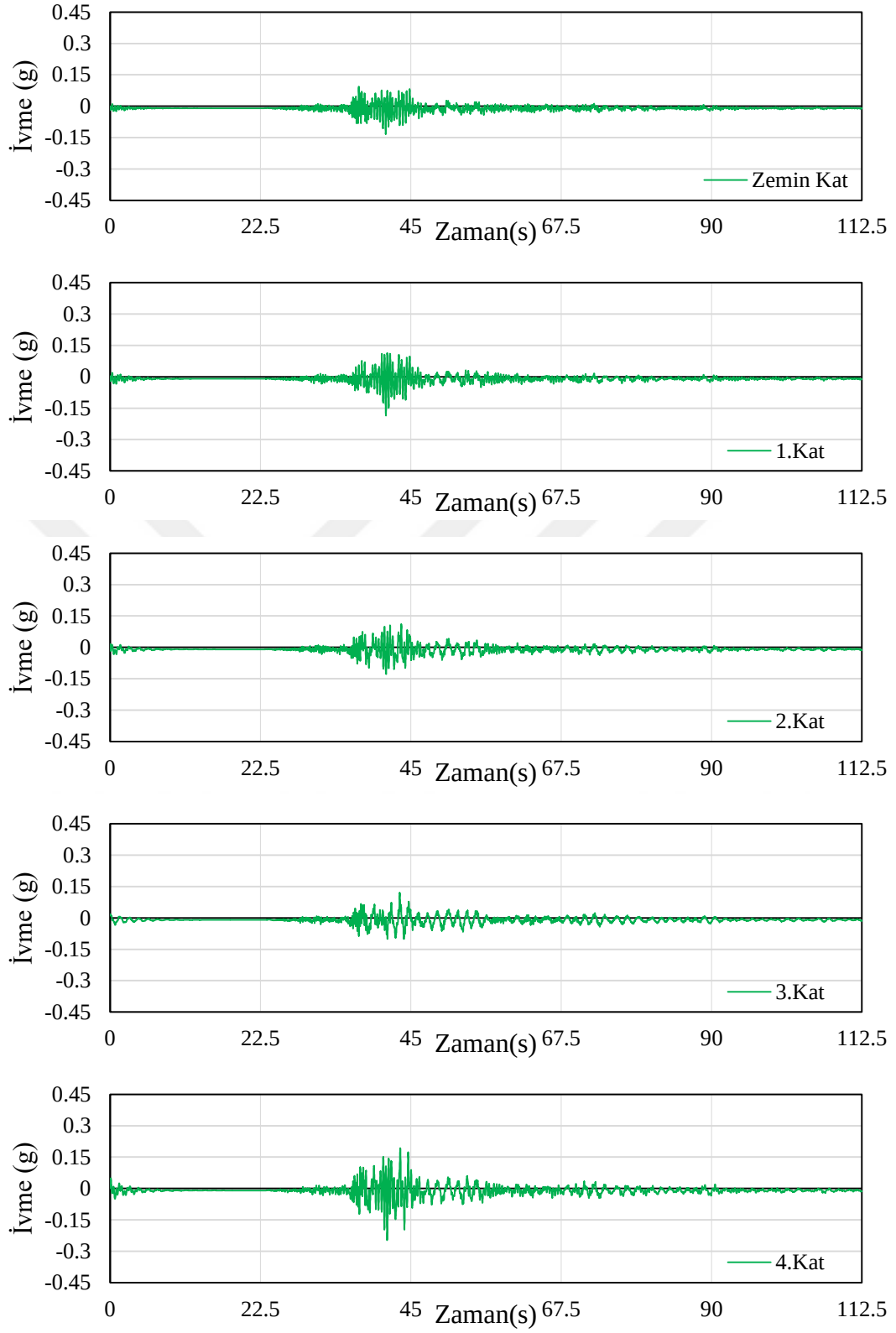
Şekil 65. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında y doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi



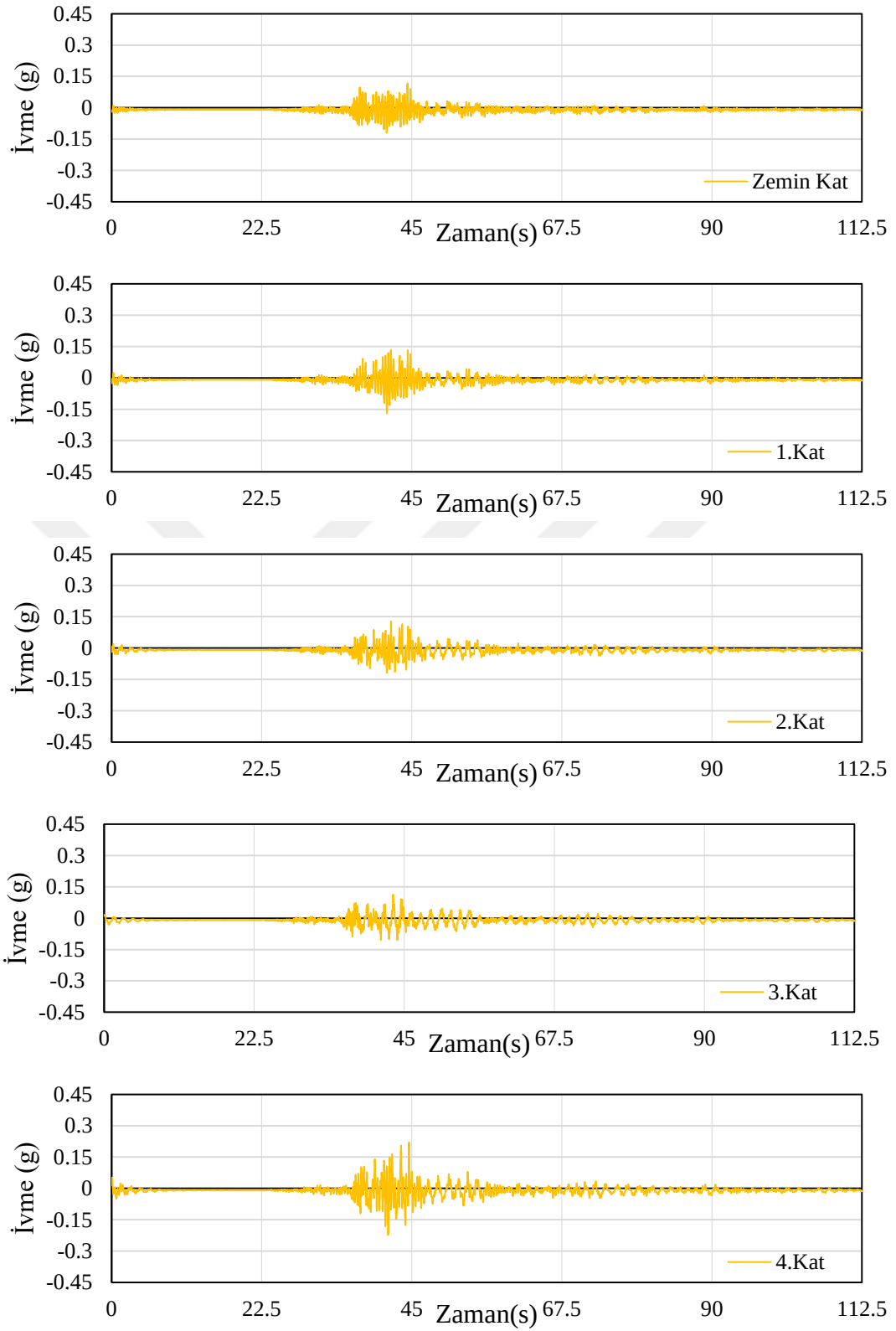
Şekil 66. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



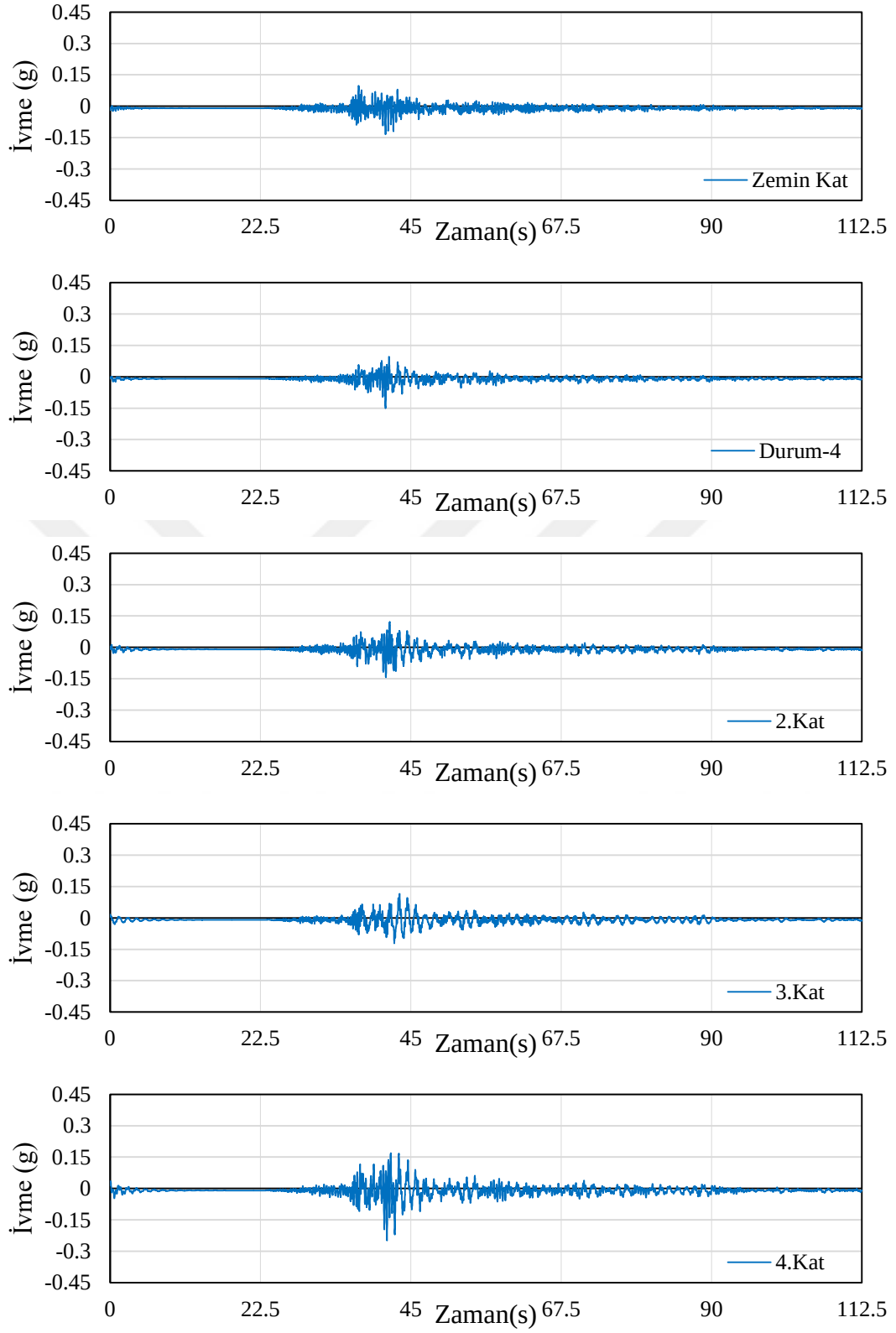
Şekil 67. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



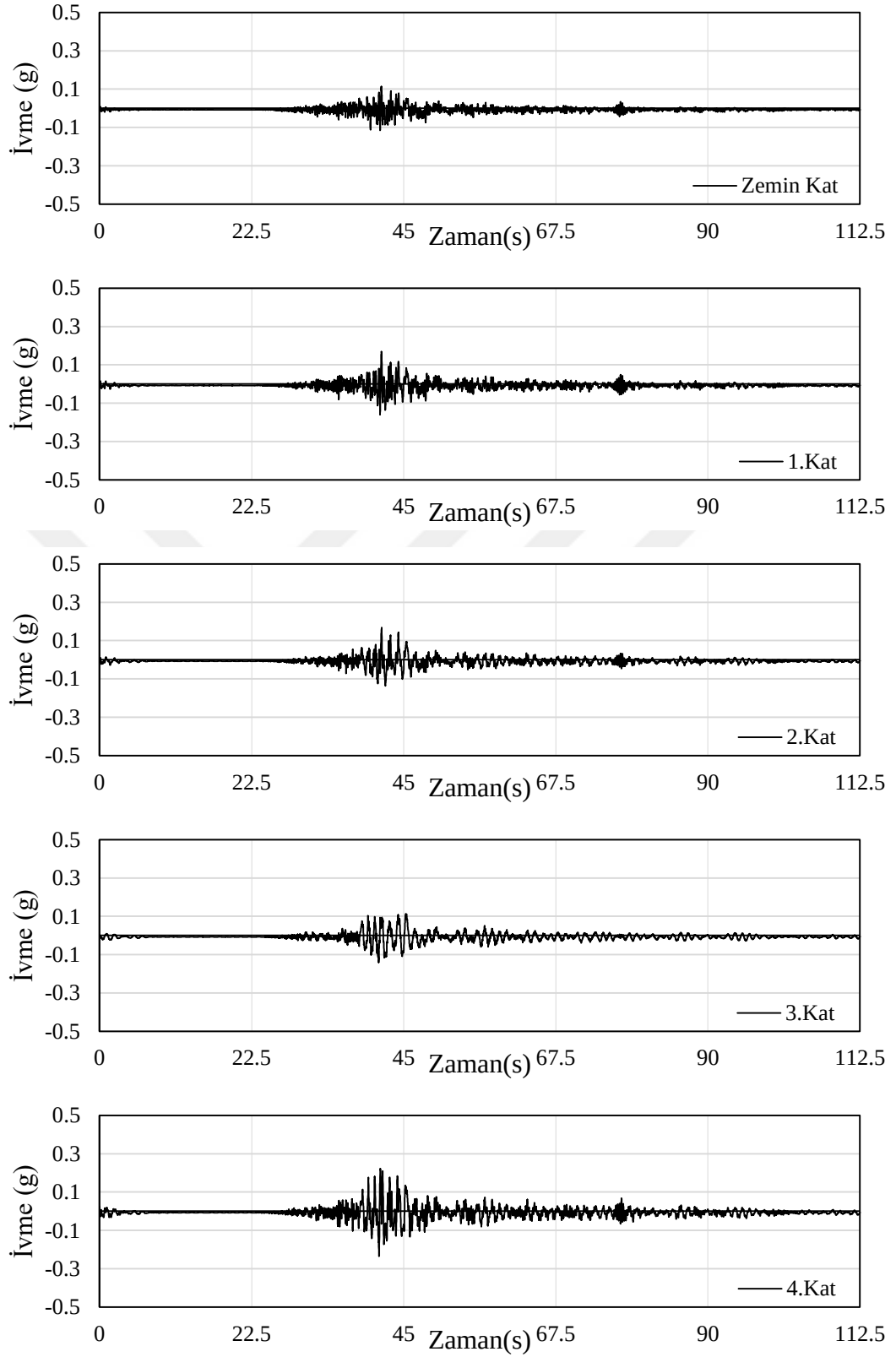
Şekil 68. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



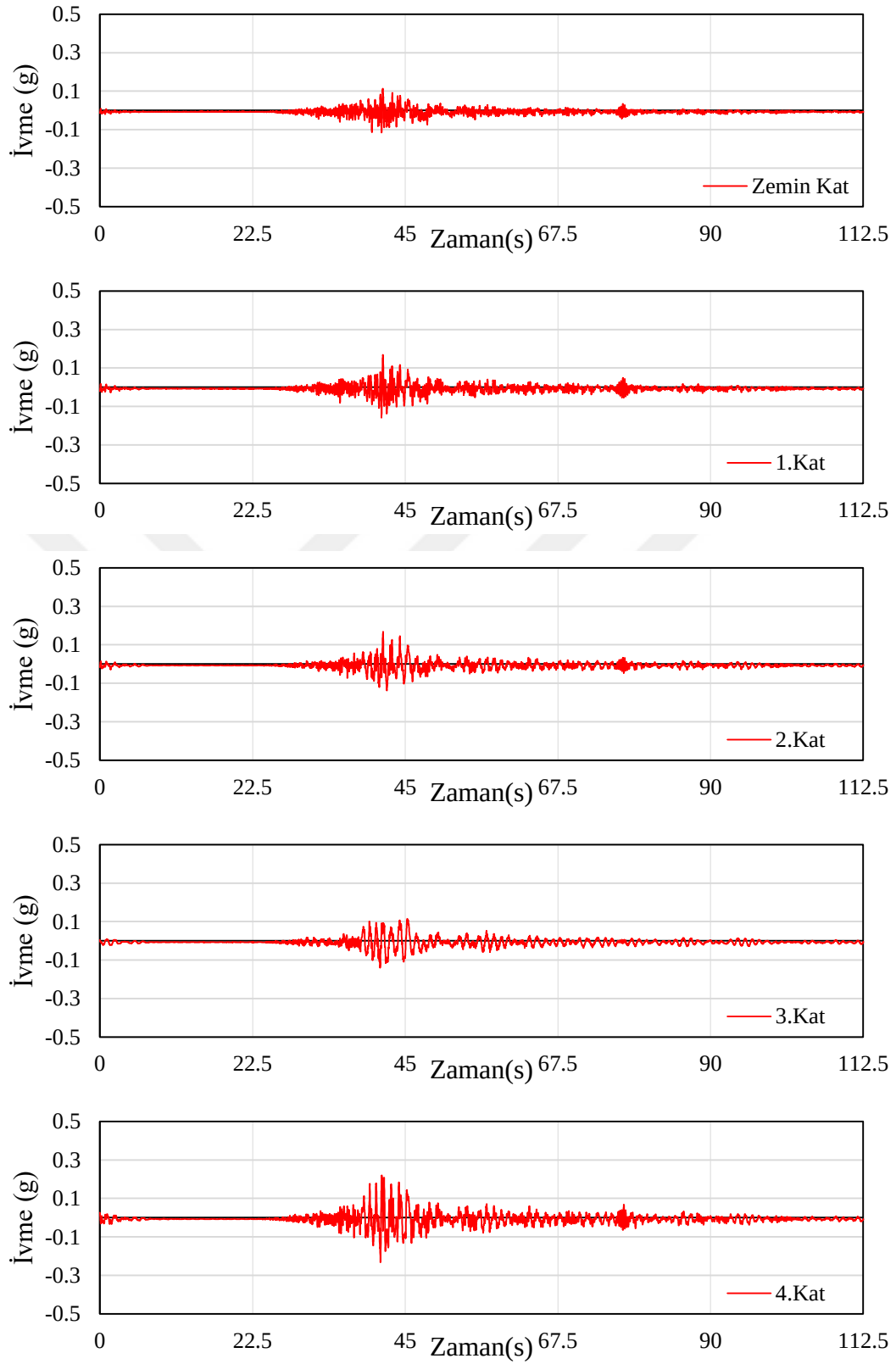
Şekil 69. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



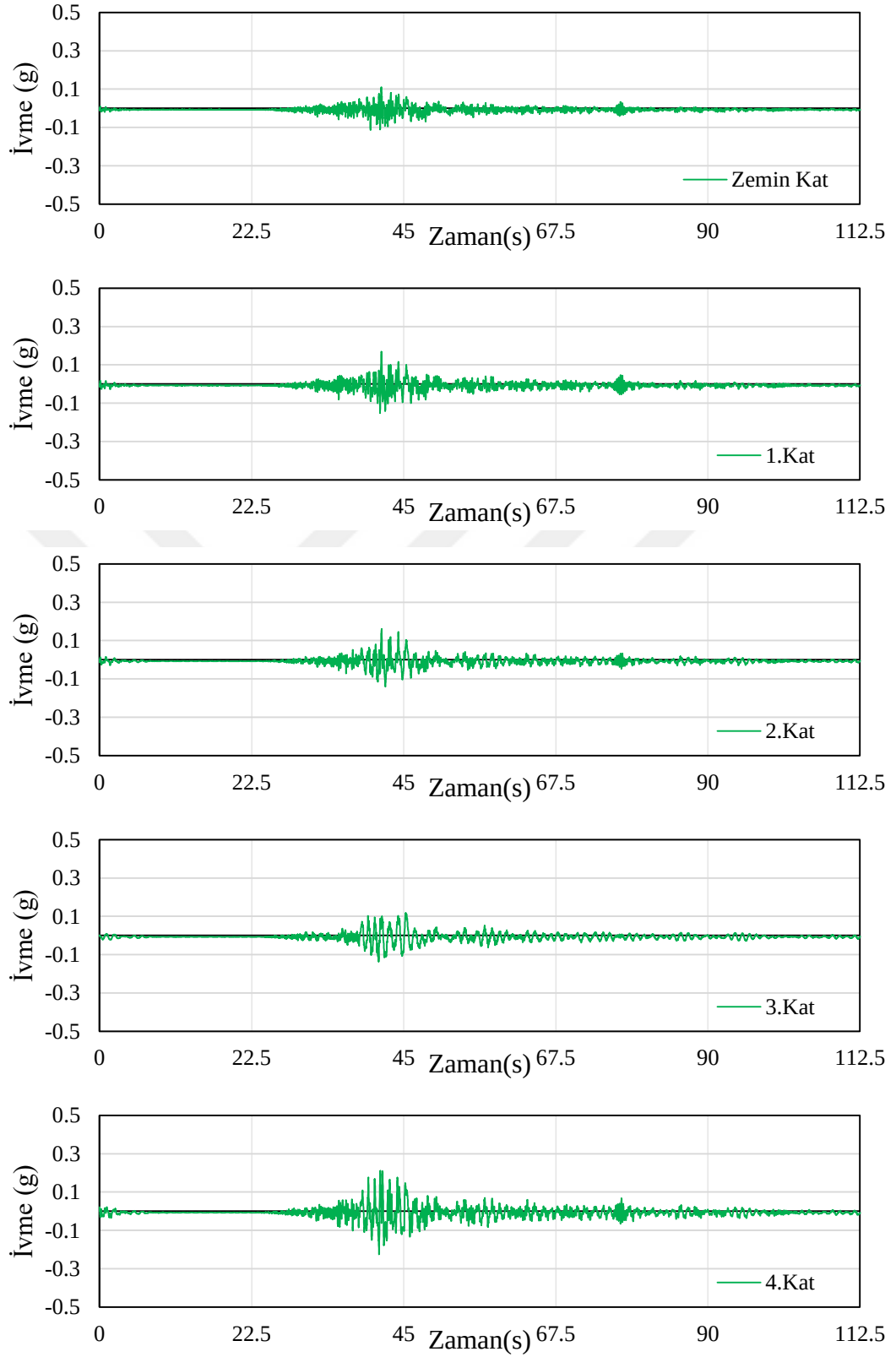
Şekil 70. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



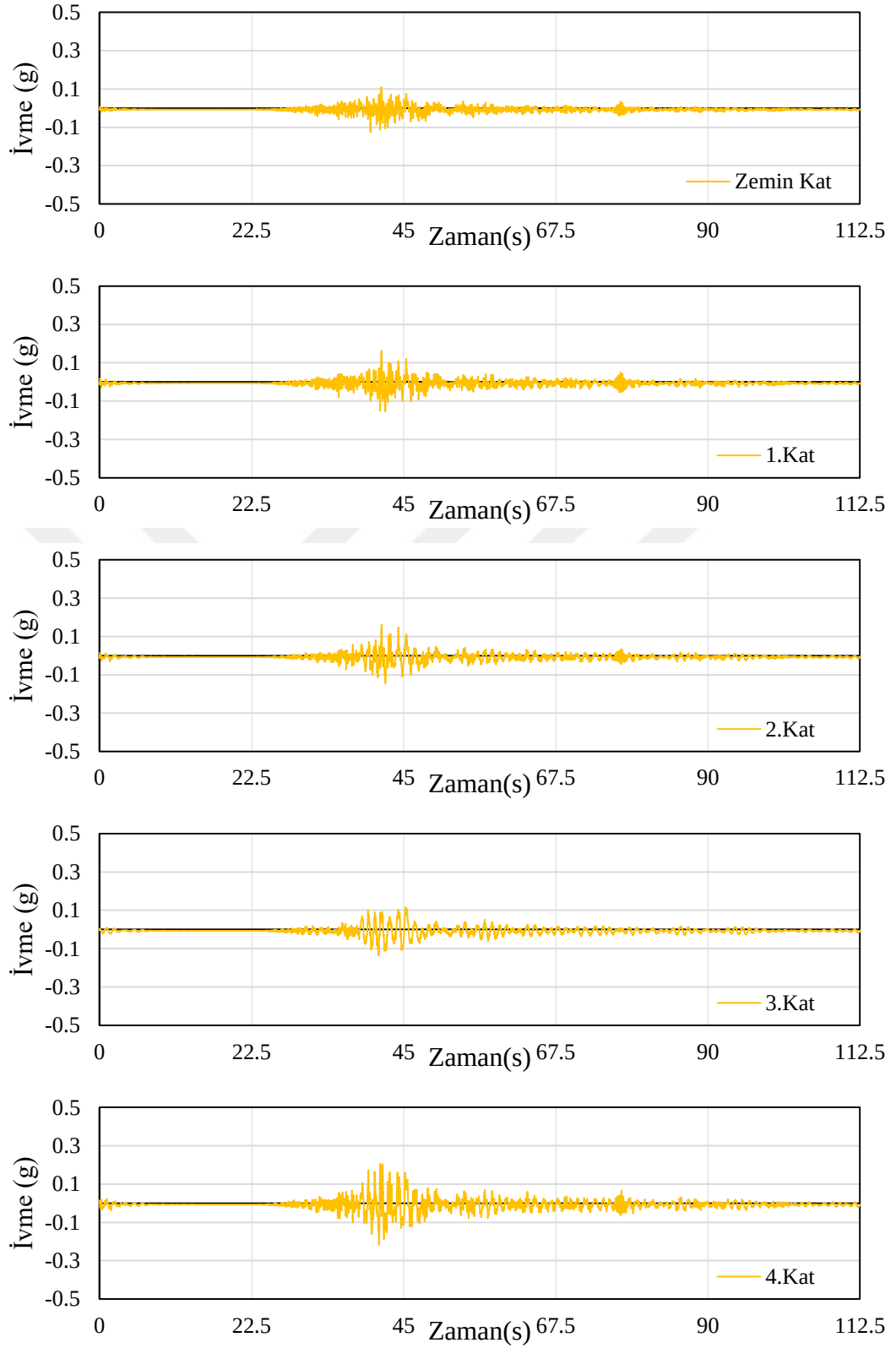
Şekil 71. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



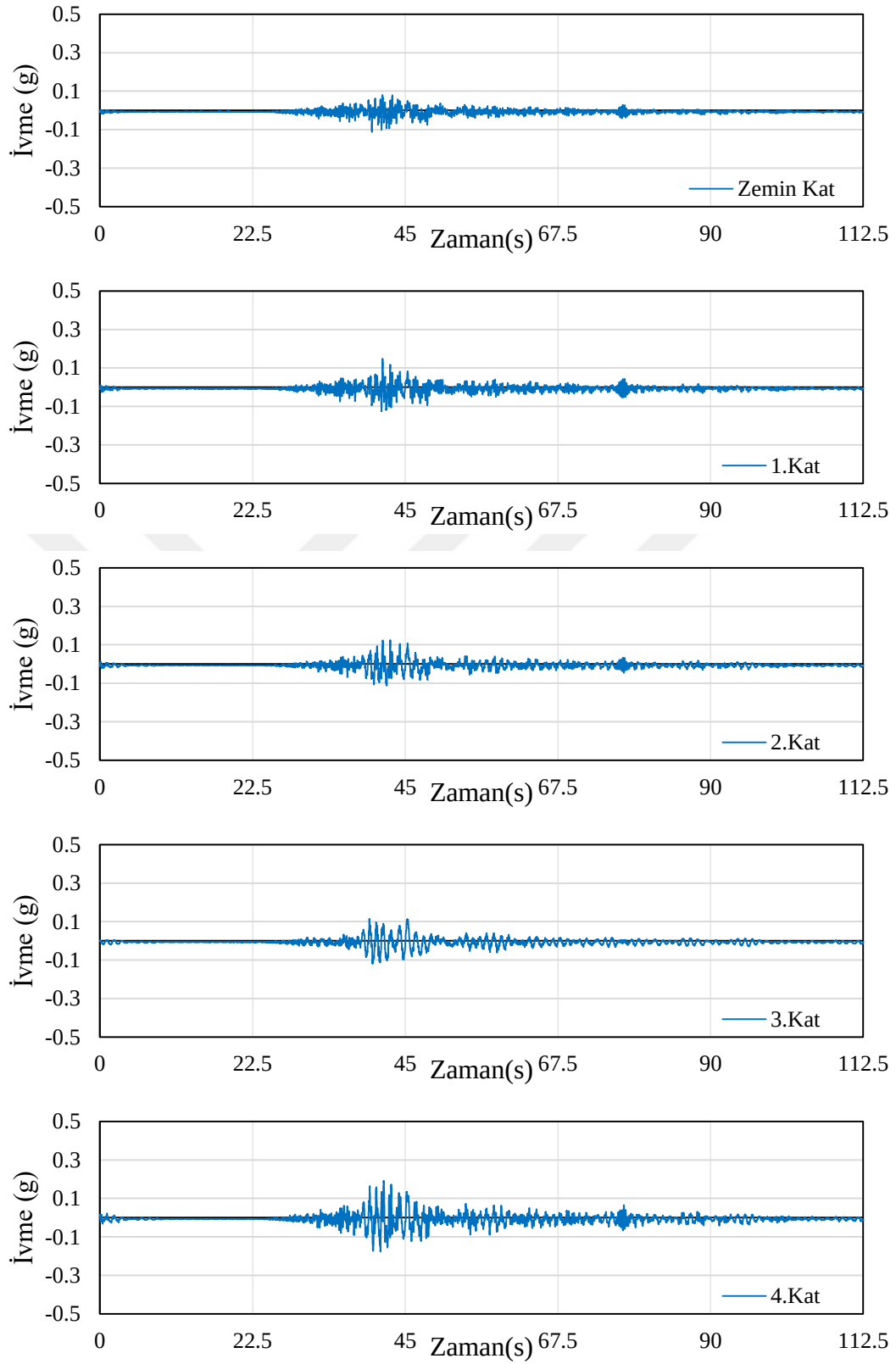
Şekil 72. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



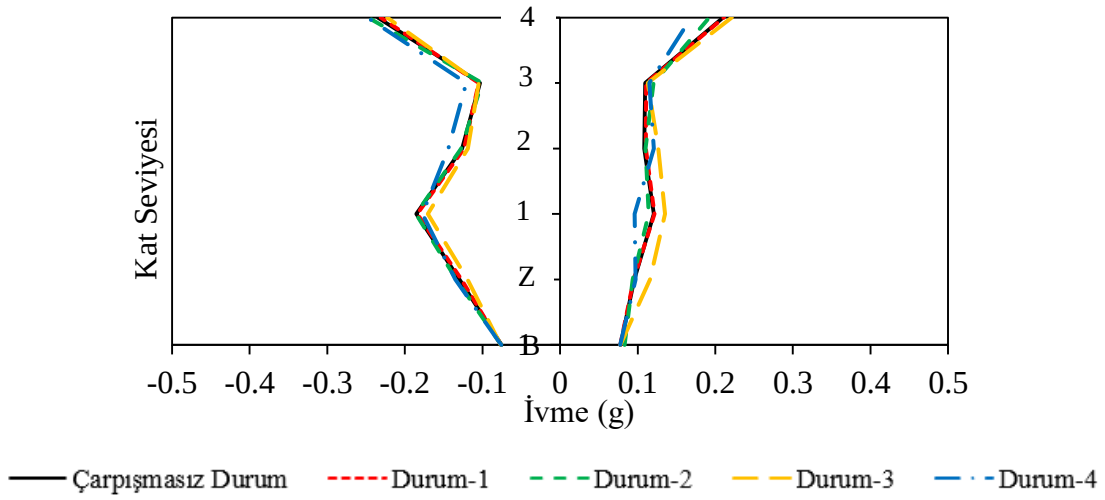
Şekil 73. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



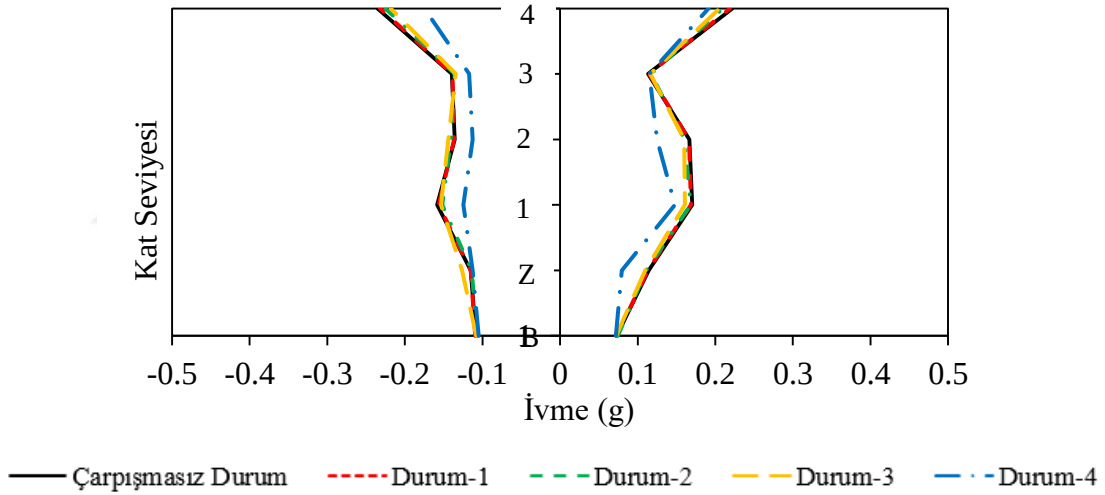
Şekil 74. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 75. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 76. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi

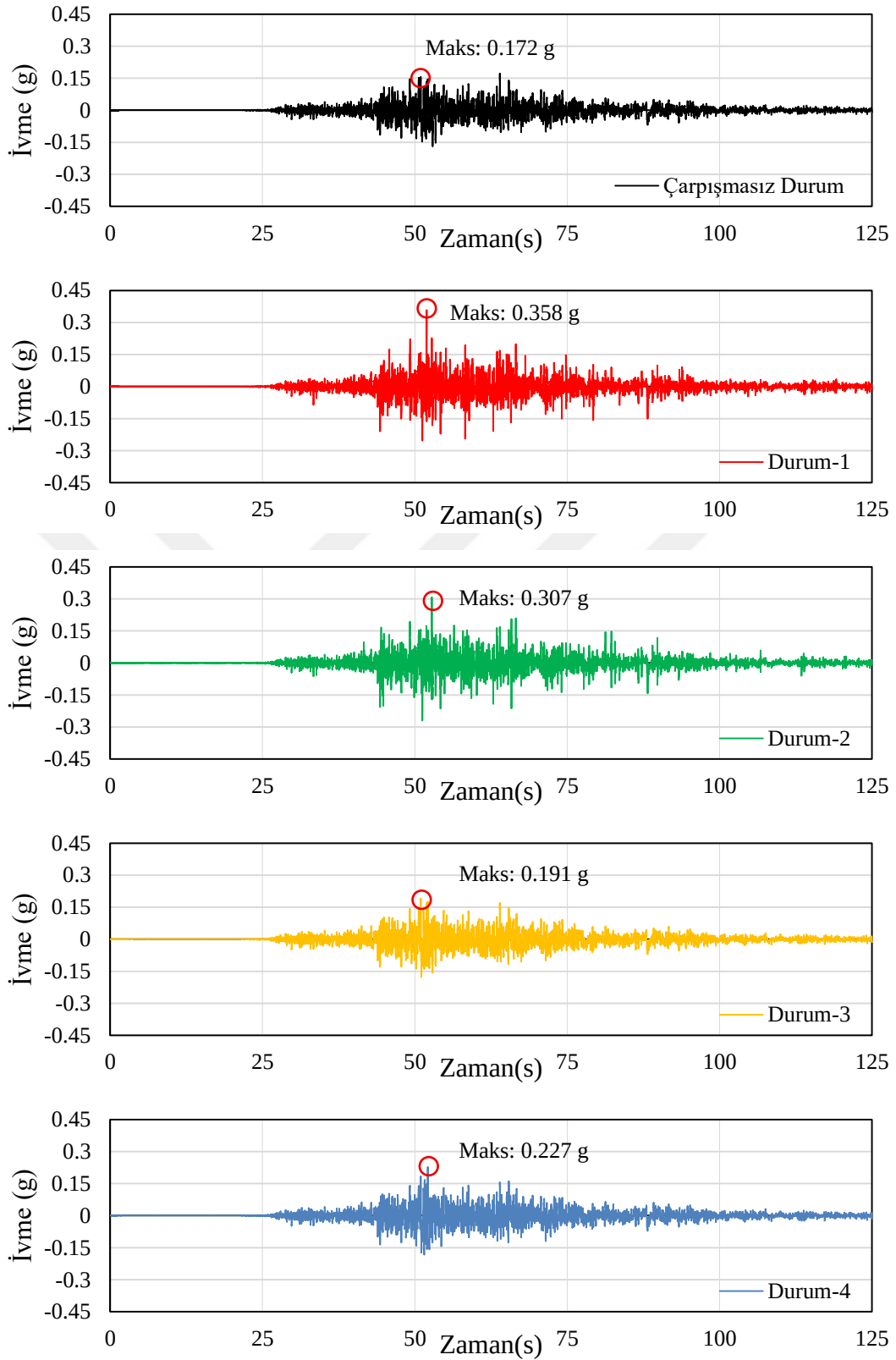


Şekil 77. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında y doğrultusunda elde edilen en büyük kat ivmesi değerlerinin değişimi

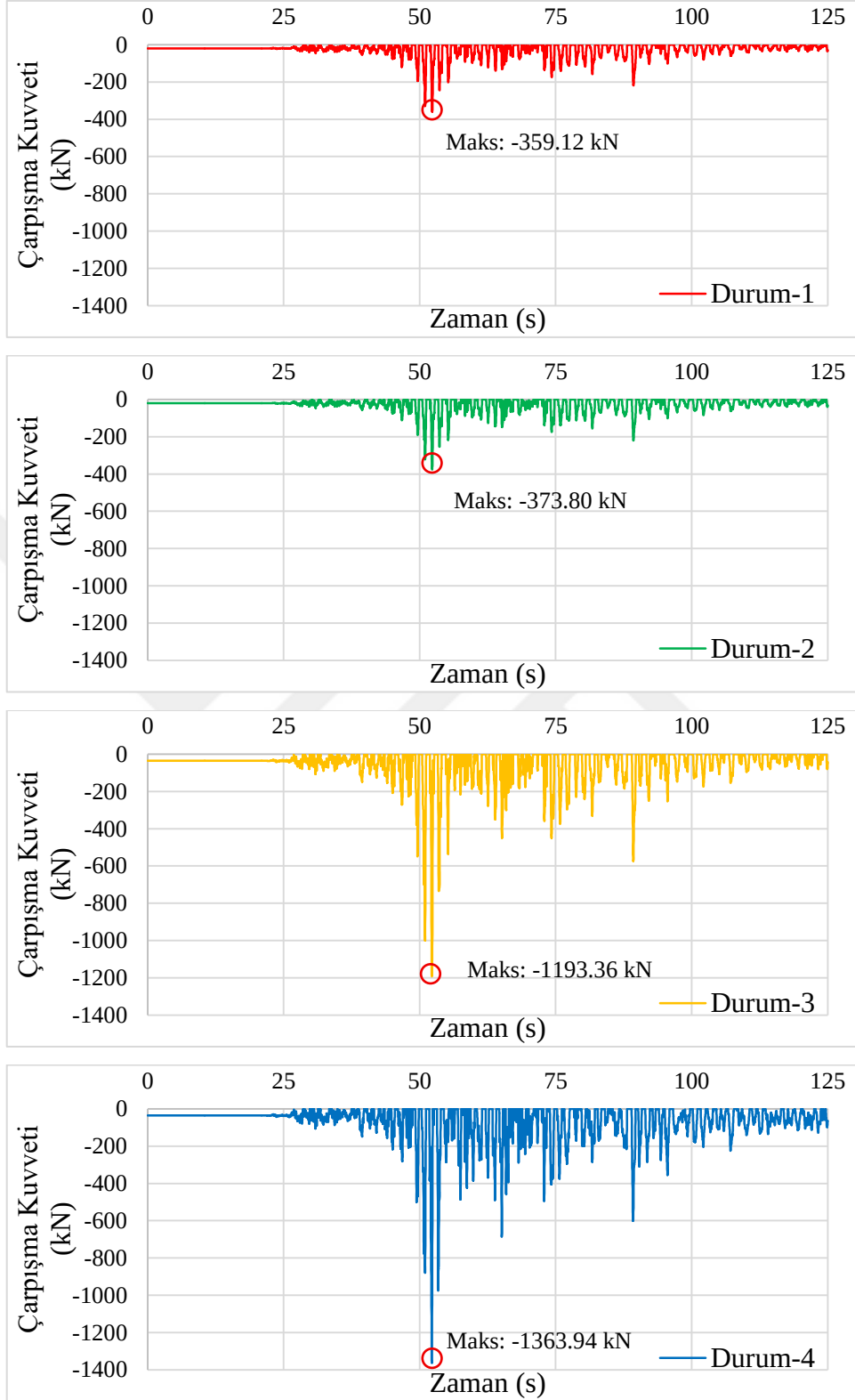
Tez çalışması kapsamında her bir senaryonun, gerçek çarpışma durumunu temsil eden Durum-1 ile karşılaştırılması amacıyla; hasar gören kolonda meydana gelen ivme değişimi ile çarpışma kuvveti arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, Şekil 78–81’de çarpışma noktasındaki ivme-zaman grafikleri ve çarpışma elemanlarında oluşan çarpışma kuvveti-zaman grafikleri sunulmuştur. Bitişik binalar arasındaki çarpışma etkileri, yapının hızında ani değişimlere neden olmakta ve bu durum ivme tepkilerinde ani artışlar olarak kendini göstermektedir. Seçilen yapıda, 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında zemin

katta yer alan bir kolon ile çevre duvar arasında çarpışmalar meydana gelmiş ve bu kolonda önemli yapısal hasarlar oluşmuştur. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremine ait analiz sonuçları incelendiğinde çarpışmanın meydana geldiği kolondaki en büyük ivme değerinin çarpışmasız duruma göre Durum-1 senaryosunda 2.08 kat, Durum-2 senaryosunda ise 1.8 kat arttığı görülmüştür. Buna karşın, Durum-3 ve Durum-4 senaryolarında çarpışan kolondaki ivme değişimleri oldukça sınırlı kalmış ve çarpışmanın etkisi Durum-1 ve Durum-2'ye göre belirgin şekilde azalmıştır (Şekil 82). 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depreminde ise çarpışmanın etkisiyle çarpışan kolonda, Durum-1 ve Durum-2 senaryolarında sırasıyla 2.82 ve 2.23 katına varan ivme artışları gözlemlenmiştir (Şekil 83).

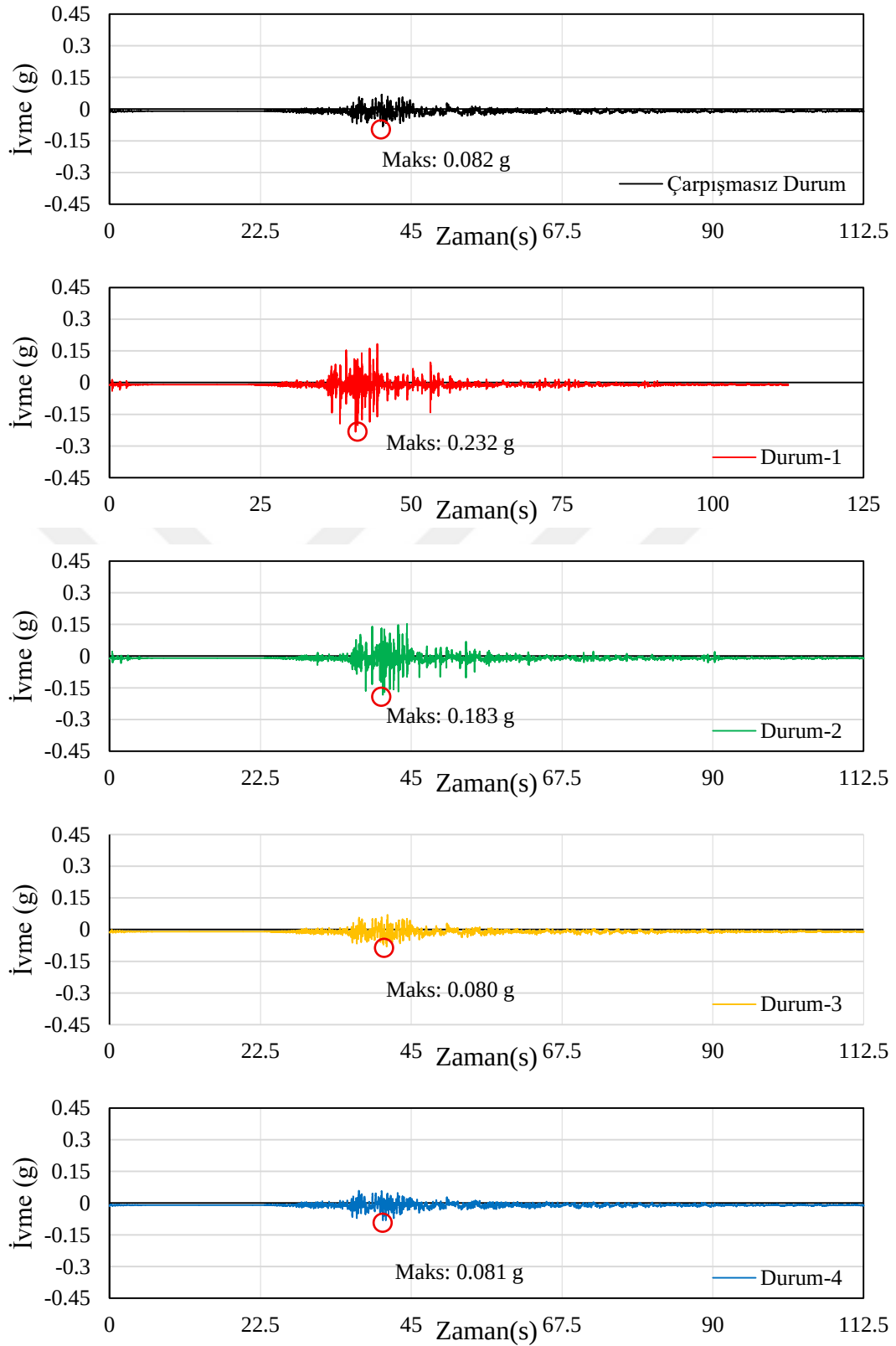
Yapı ile çevre duvar arasındaki çarpışmadan kaynaklanan maksimum çarpışma kuvveti Durum-1'de 359.12 kN, Durum-2'de 373.80 kN, Durum-3'te 1193.36 kN, Durum-4'te 1363.94 kN olarak elde edilmiştir (Şekil 79). Durum-3 ve Durum-4'te çarpışmanın döşeme seviyesinde gerçekleşmesi sebebiyle çarpışma kuvvetleri kolon çarpışmalarına (Durum-1 ve Durum-2) göre daha büyüktür. Ancak kolon çarpışmalarında çarpışma yüzeyinin oldukça sınırlı olması nedeniyle çarpışma sırasında aktarılan kesme kuvvetleri kolonlarda ciddi hasarlara neden olabilmektedir. Nitekim ele alınan binada da depremler sonrası etkileşimin meydana geldiği kolonda ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Öte yandan, Şekil 7881'in karşılaştırmalı değerlendirilmesi, çarpışma kuvvetinin en yüksek değerine ulaştığı zaman aralığının maksimum ivmenin meydana geldiği anla çakıştığını göstermektedir. Bu durum, çarpışma sonucu oluşan çarpışma kuvvetlerinin yapının yapısal tepkilerini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.



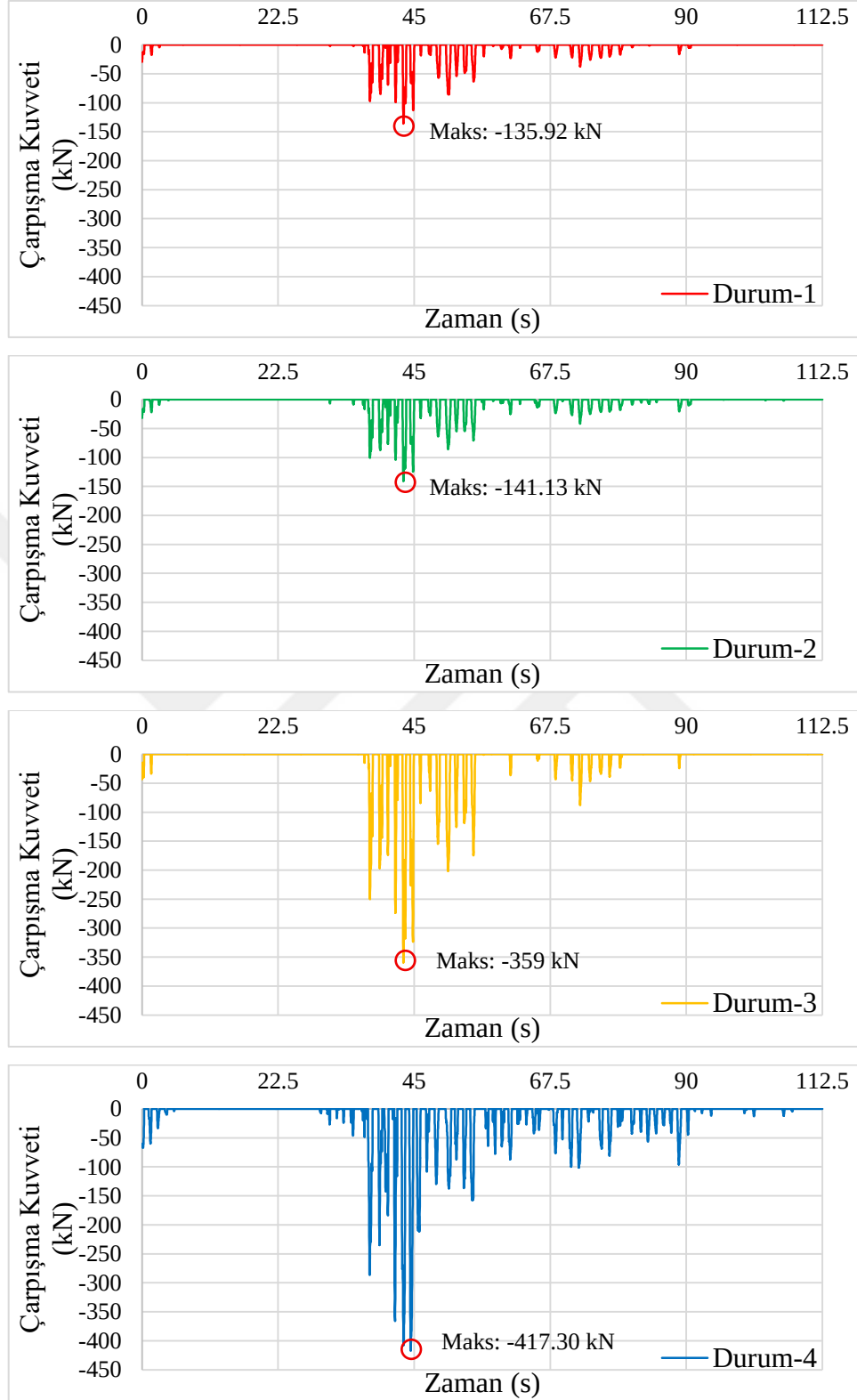
Şekil 78. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki ivme-zaman grafiklerinin seçilen senaryolar için karşılaştırılması (Pazarcık depremi)



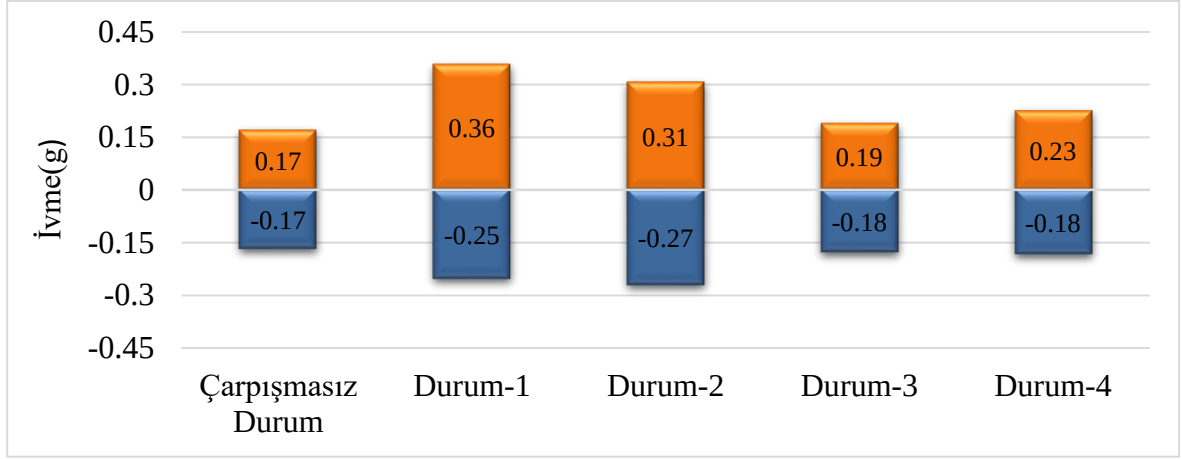
Şekil 79. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depreminde elde edilen çarpışma kuvveti-zaman grafikleri



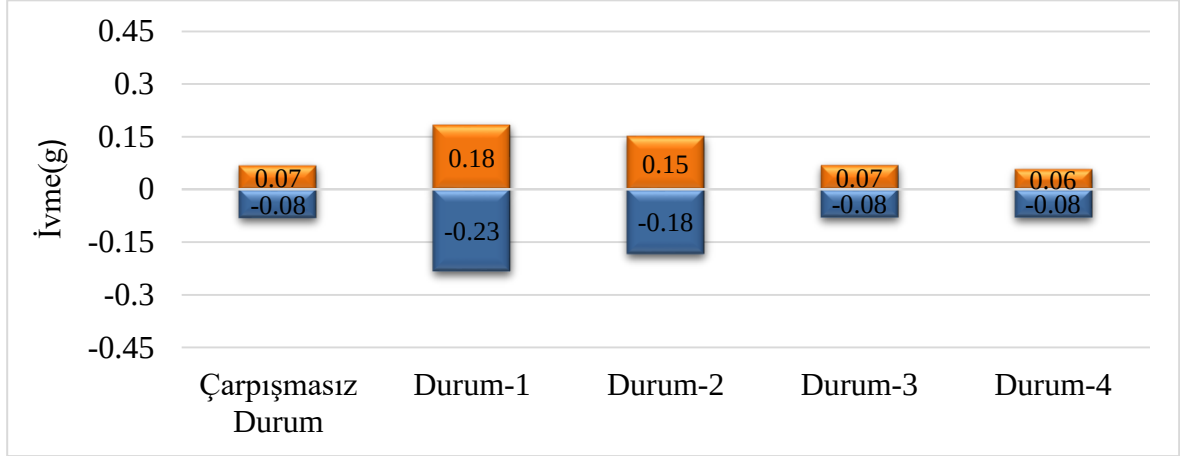
Şekil 80. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki ivme-zaman grafiklerinin seçilen senaryolar için karşılaştırılması (Elbistan depremi)



Şekil 81. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depreminde elde edilen çarpışma kuvveti-zaman grafikleri



Şekil 82. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Pazarcık depremi)



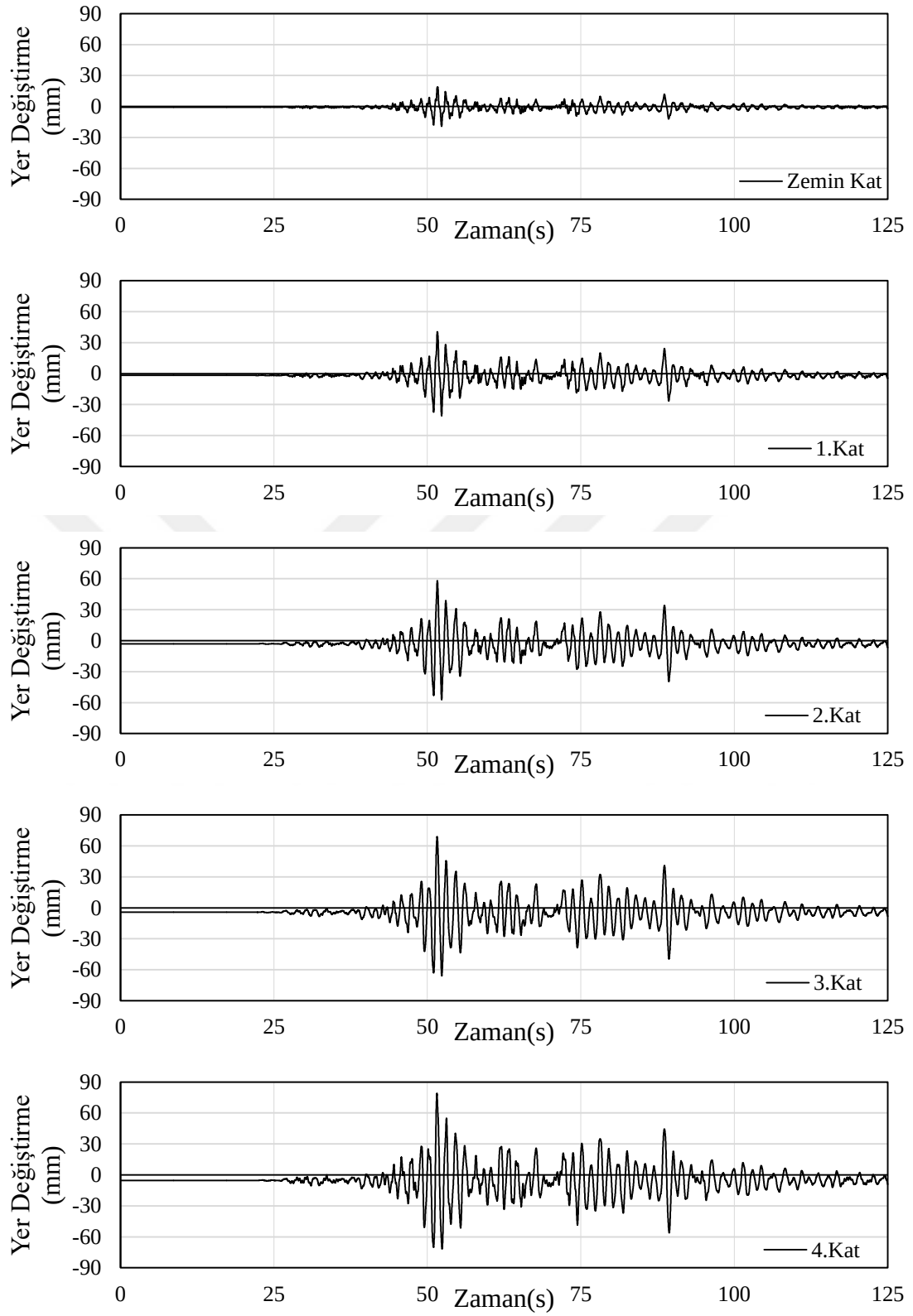
Şekil 83. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolondaki maksimum ivme değerlerinin karşılaştırılması (Elbistan depremi)

3.2.4. Kat Yer Değiştirmeleri

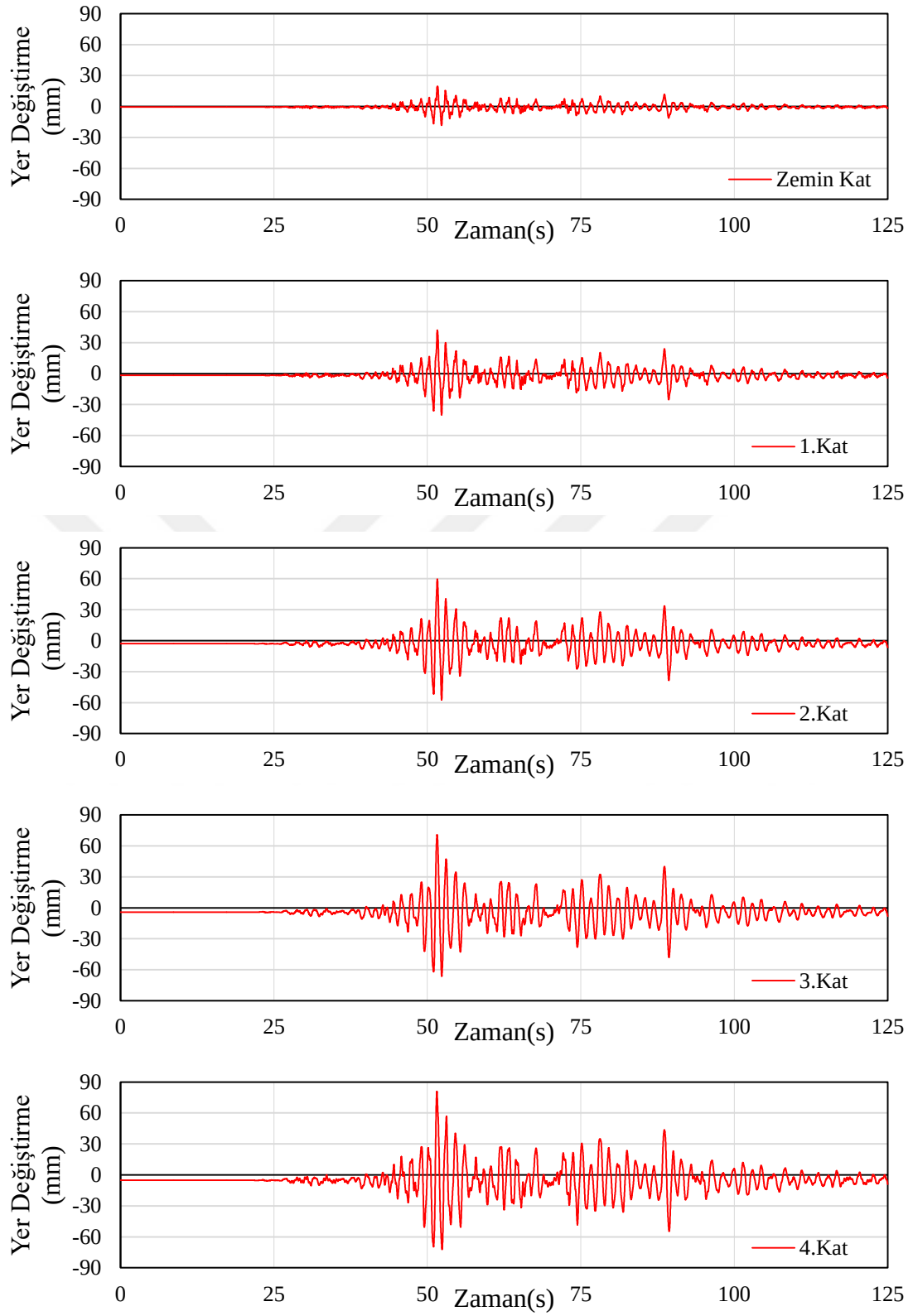
Analizler sonucunda kat seviyelerinde elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri Şekil 84-103'te en büyük yer değiştirme değerleri ise Tablo 5-6'da ve Şekil 104 ve 105'te verilmiştir. Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı çarpışmasız durumda Zemin kat, 1., 2., 3., ve 4. kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi için sırasıyla 19.17 mm, 40.59 mm ve 58.08 mm, 68.94 mm ve 78.76 mm; 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi için sırasıyla 9.31 mm, 18.43 mm, 27.06 mm, 36.32 mm ve 45.66 mm'dir. Yapının mevcut durumunu temsil eden kolon-çevre duvar çarpışmasının incelendiği Durum-1'de bu değerler Pazarcık depremi için 19.52 mm, 41.96 mm, 59.64 mm, 70.76 mm ve 80.93 mm; Elbistan depremi için 9.51 mm, 18.51 mm, 27.39 mm, 36.61 mm ve 45.43 mm olarak elde edilmiştir. Kolon ve çevre duvarın binanın her iki cephesinde çarpıştığı Durum-2'de, Pazarcık depremi için elde edilen değerler sırasıyla 18.98 mm, 41.35 mm, 59.02 mm, 70.65 mm ve 81.18 mm; Elbistan depremi içinse 8.99 mm, 17.65 mm, 27.21 mm, 38.34 mm ve 47.37 mm'dir. Döşeme ile çevre duvar arasında tek cephede çarpışmanın tanımlandığı Durum-3'te, Pazarcık depremi için yer değiştirmeler 21.68 mm ile 88.67 mm, Elbistan depremi için ise 10.52 mm ile 45.55 mm arasında elde edilmiştir. İki cephede duvar-döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Durum-4'te ise bu değerler Pazarcık depremi için 13.91 mm ile 84.83 mm, Elbistan depremi için 7.35 mm ile 43.20 mm arasında değişmektedir.

İki yapı arasında yeterli derz mesafesinin bulunmaması ve etkileşimin meydana gelmesi durumunda, yapıların yer değiştirme talepleri iki farklı şekilde etkilenebilmektedir. Çarpışmanın gerçekleştiği doğrultuda yer değiştirme tepkilerinde genellikle azalma meydana gelirken, yalnızca tek cephede çarpışmanın bulunduğu durumlarda, etkileşimin olmadığı serbest doğrultuda aktarılan enerji nedeniyle ivmelerde olduğu gibi daha yüksek yer değiştirme talepleri gözlemlenebilmektedir (Sunca, 2023). 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında gerçekleştirilen analizler neticesinde, çarpışma nedeniyle çarpışmanın gerçekleştiği doğrultu olan x doğrultusunda en büyük yer değiştirme değerleri genel olarak artış göstermektedir. Öte yandan, etkileşim yönünde yer değiştirmeler azalma eğilimi gösterirken serbest yönde artışlar meydana gelmektedir. Özellikle Durum-4'te çarpışmanın iki tarafta da gerçekleşmesi nedeniyle yer değiştirmelerin daha düşük kaldığı gözlemlenmektedir. Çarpışmanın olmadığı doğrultu olan y doğrultusunda ise yer değiştirmelerdeki değişimler daha düşük düzeyde kalmıştır. Genel olarak, Durum-1 ve

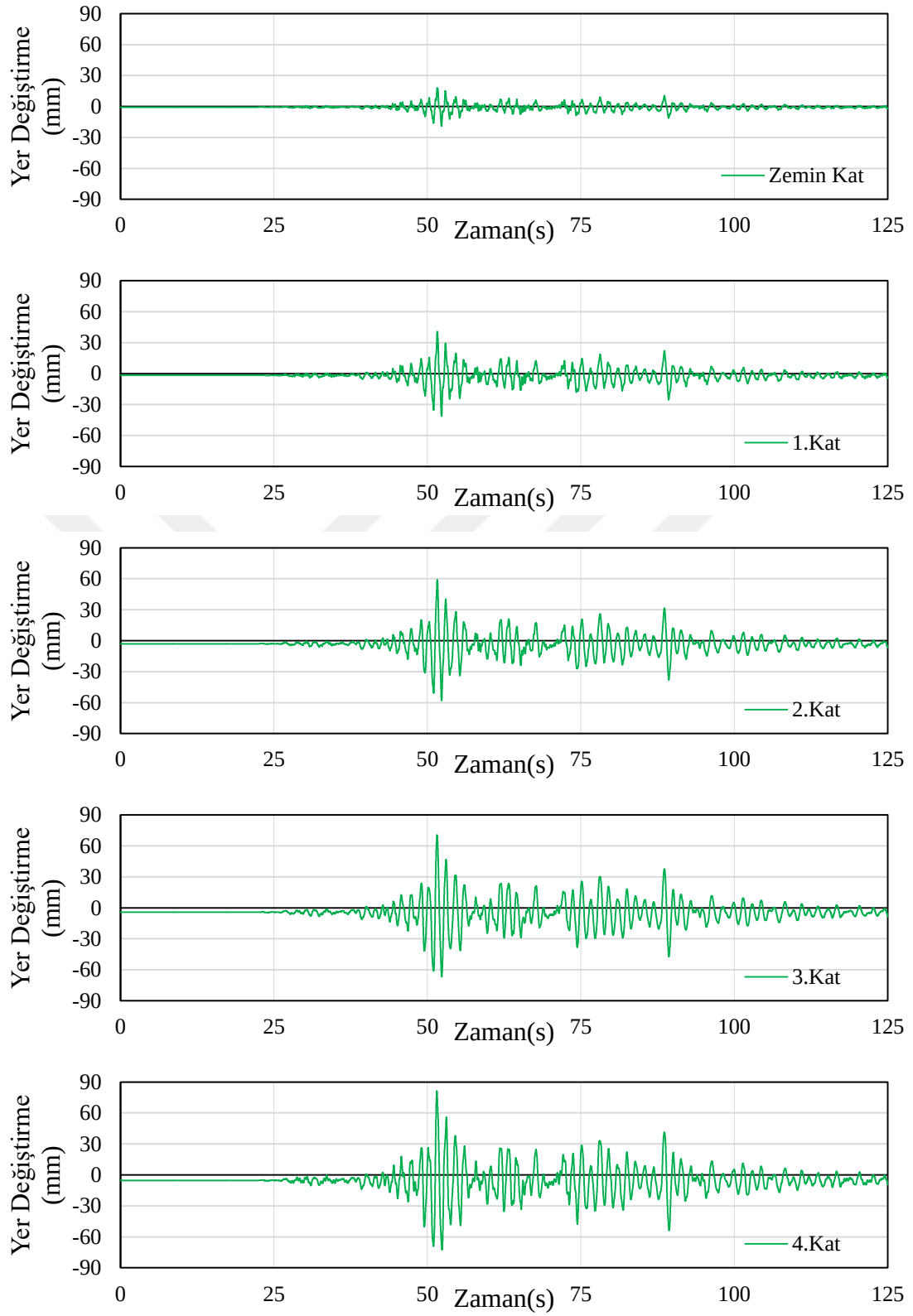
Durum-3'te yer değiştirme taleplerinde gözlenen artışlar, çarpışmanın yalnızca tek cephede meydana gelmesi nedeniyle yapının serbest yönünde daha fazla hareket edebilmesine bağlanmaktadır. Özellikle Durum-3'te, kat ivmelerindeki artışın çarpışma kuvvetlerini arttırmasıyla yapıya aktarılan enerjinin arttığı ve bunun yer değiştirme taleplerinde daha belirgin artışlara yol açtığı değerlendirilmiştir. Durum-2 ve Durum-4 senaryoları karşılaştırıldığında ise, çarpışmaların iki yönde birden gerçekleşmiş olması nedeniyle yer değiştirmelerin genellikle azaldığı görölmektedir. Analizler sonucunda kat seviyelerinde elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinde çarpışma nedeniyle oluşan değişimler Şekil 106'da sunulmuştur. Bu değişimler, çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı ve alındığı senaryolardan elde edilen sonuçlar kıyaslanarak hesaplanmıştır. Durum-1 için gerçekleştirilen analizler sonucunda yer değiştirmelerin Pazarcık ve Elbistan depremleri için sırasıyla zemin kat seviyesinde %3.54 ve %2.12, 1.katta %3.59 ve %0.43, 2.katta %2.68 ve %1.23, 3.katta %2.64 ve %1.32 arttığı görölmüştür. 4.katta Pazarcık depremi için % 2.76 artarken Elbistan depremi için %0.28 azalmıştır. Durum-2'de Pazarcık depremi için elde edilen en büyük yer değiştirme değerinde zemin katta çarpışmasız duruma göre, %0.99 azalma olurken, Elbistan depremi için bu katta %3.44 azalma olmuştur. Bu durumda 1-4.kat seviyelerinde en büyük yer değiştirmelerdeki artış Pazarcık depremi için %1.88, %1.62, %2.48 ve %3.07 olarak elde edilmiştir. Elbistan depreminde 1. katta %4.21 azalma meydana gelirken; 2., 3. ve 4.katlarda %0.57, %5.57 ve %3.75'lik bir artış gözlenmiştir. Döşeme seviyesinde tek taraflı çarpışmayı temsil eden Durum-3'te, Pazarcık depreminde Zemin-4. katlarda sırasıyla %15.01, %10.81, %8.27, %10.96 ve %12.59 artış gözlenmiştir. İki taraflı döşeme çarpışmasının dikkate alındığı Durum-4'te ise Pazarcık depreminde zemin-3. katlarda yer değiştirmelerde gerçekleşen azalma miktarı %27.42, %19.53, %8.81, %0.41 iken 4. katta %7.71 artış olmuştur. Elbistan depreminde ise maksimum yer değiştirmeler Zemin katta %21.09, 1. katta %12.03, 4. katta %5.38 azalmış; 2. ve 3. katta ise %1.08 ve %1.22 artmıştır.



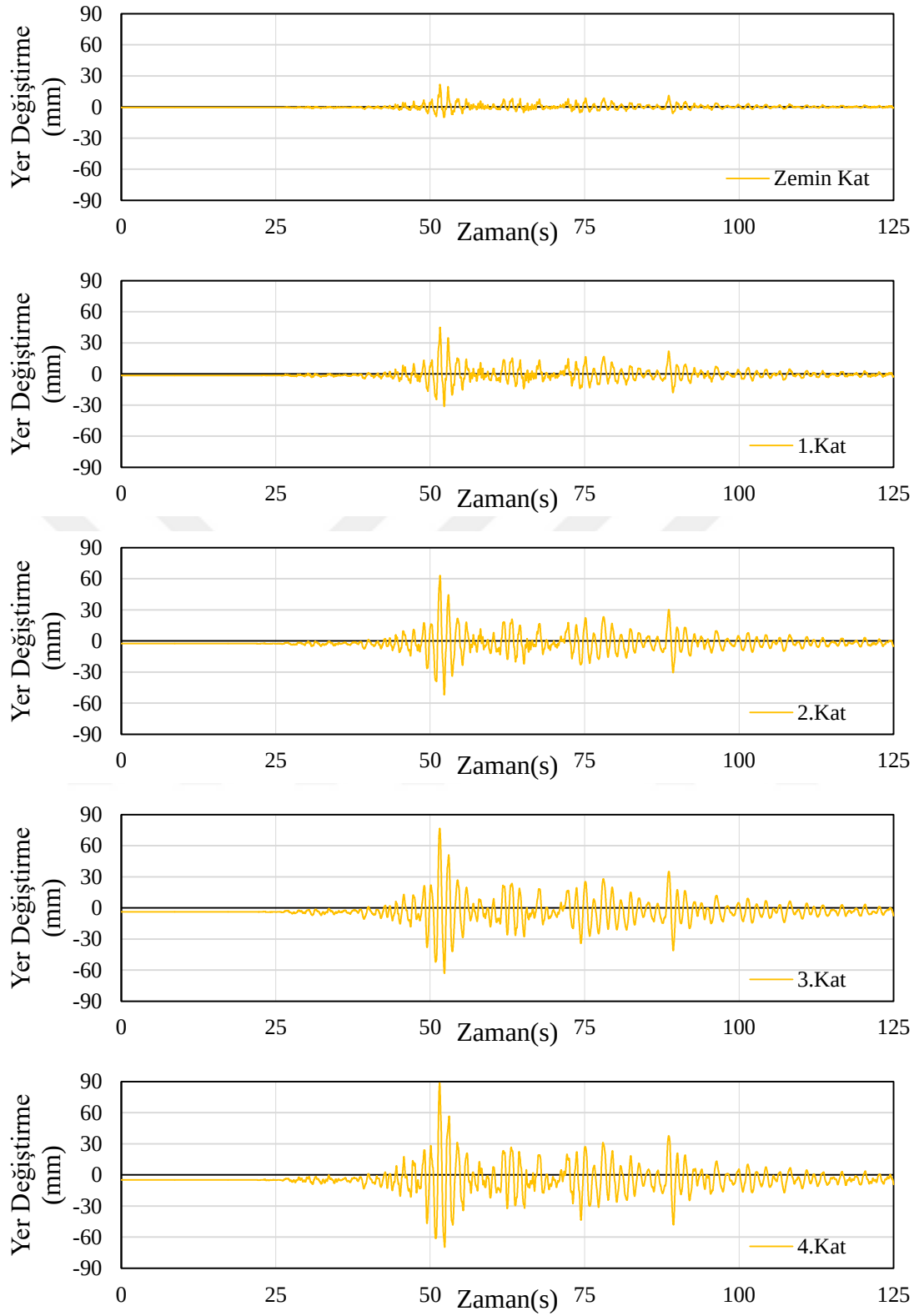
Şekil 84. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



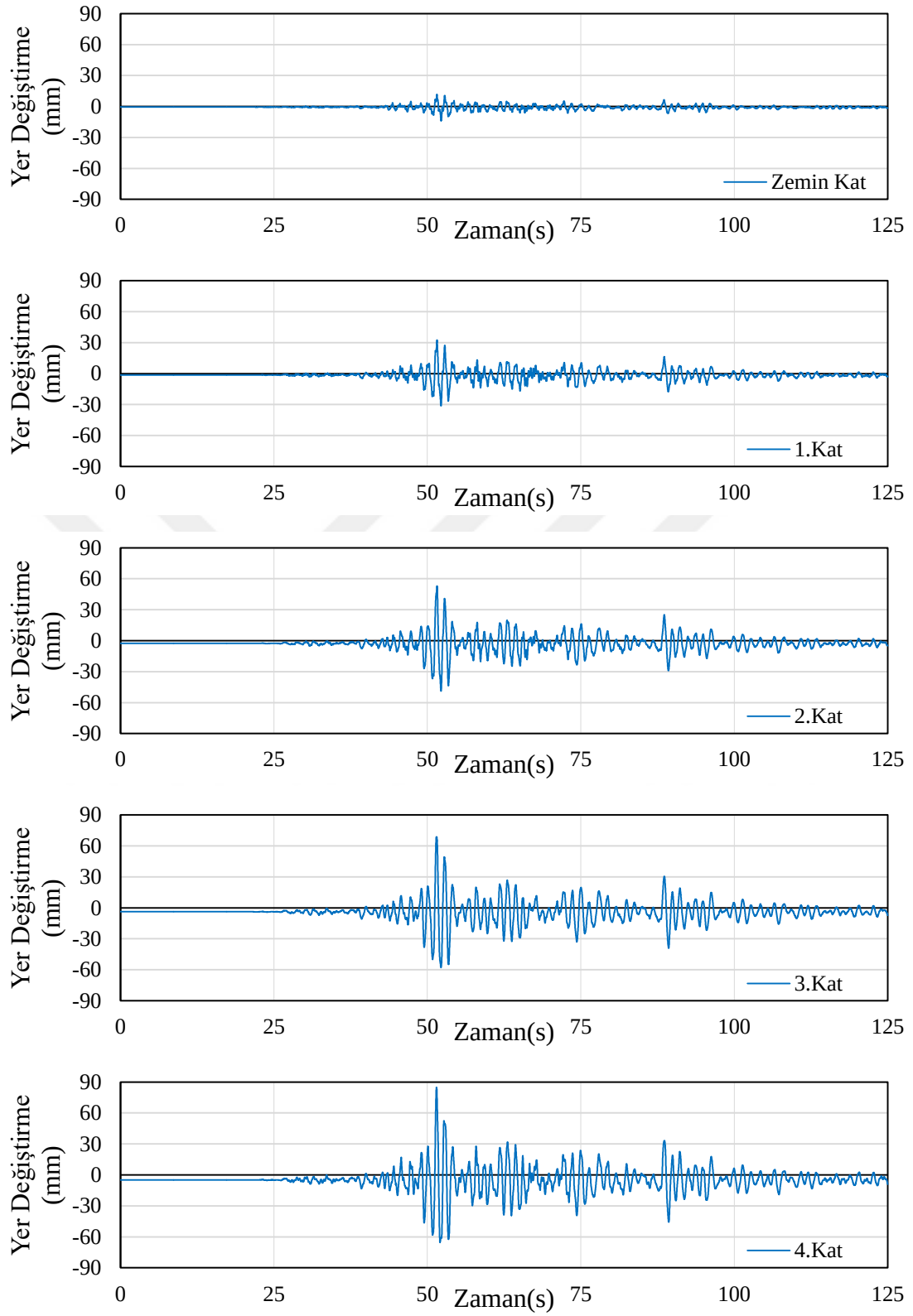
Şekil 85. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



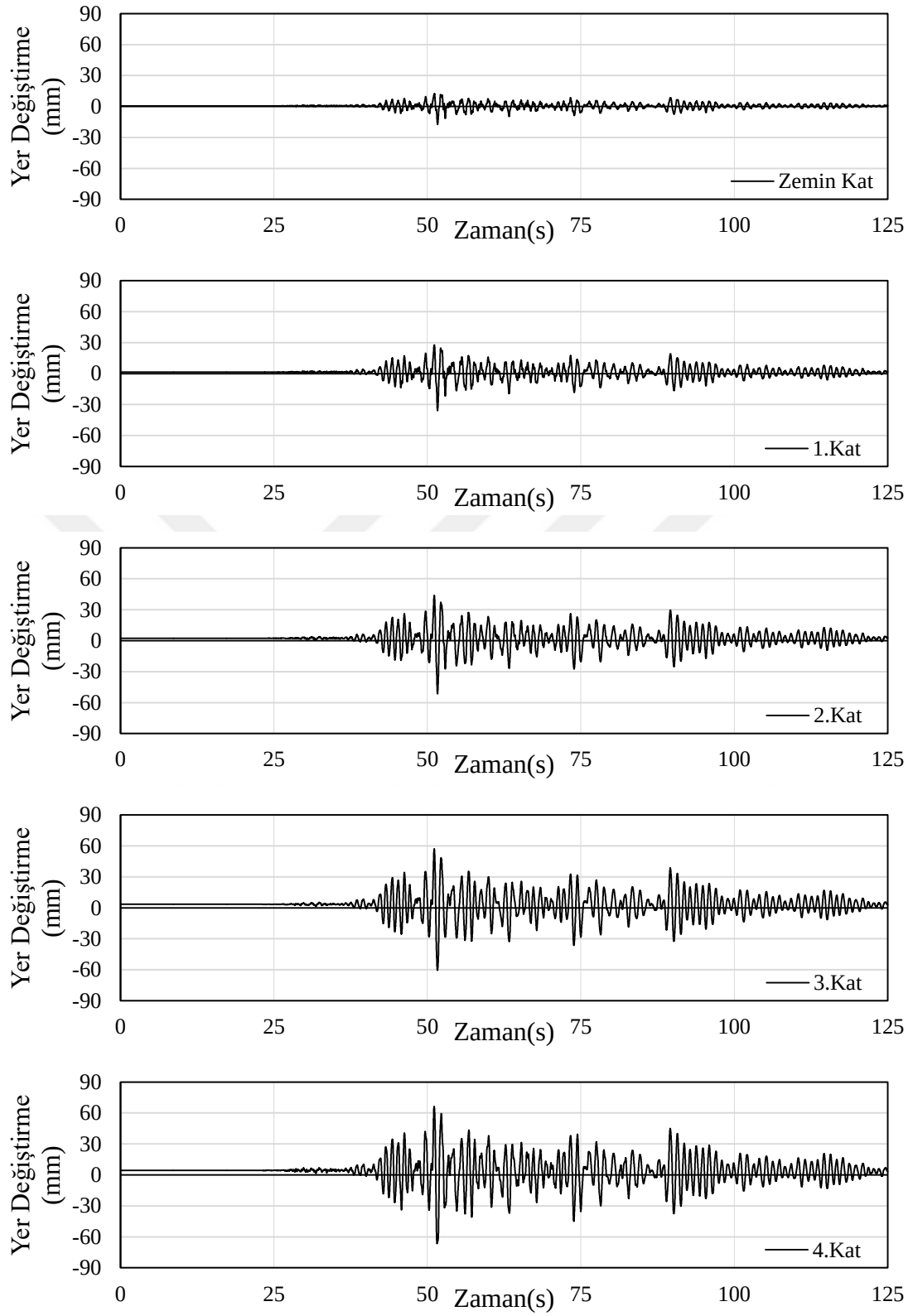
Şekil 86. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



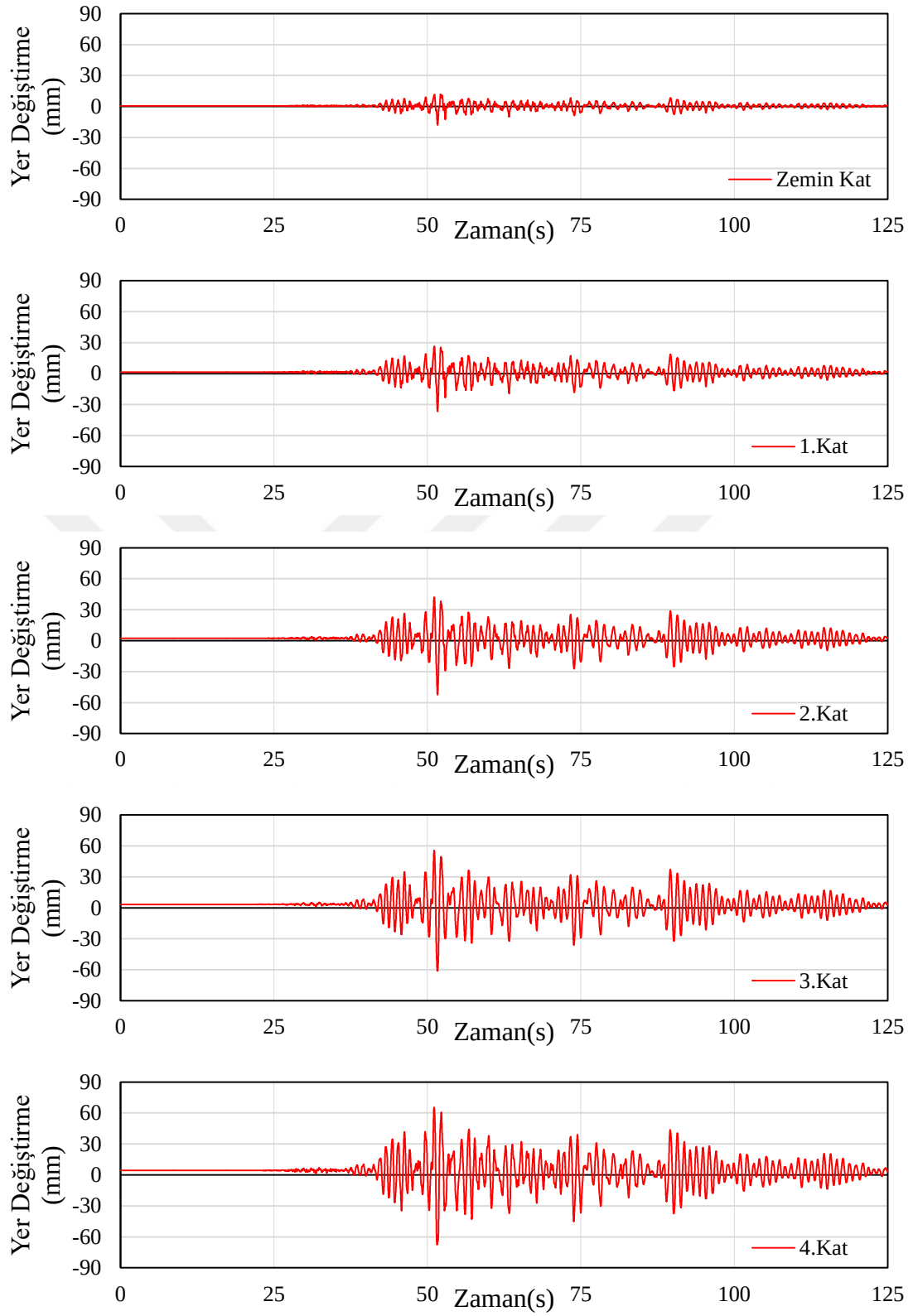
Şekil 87. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



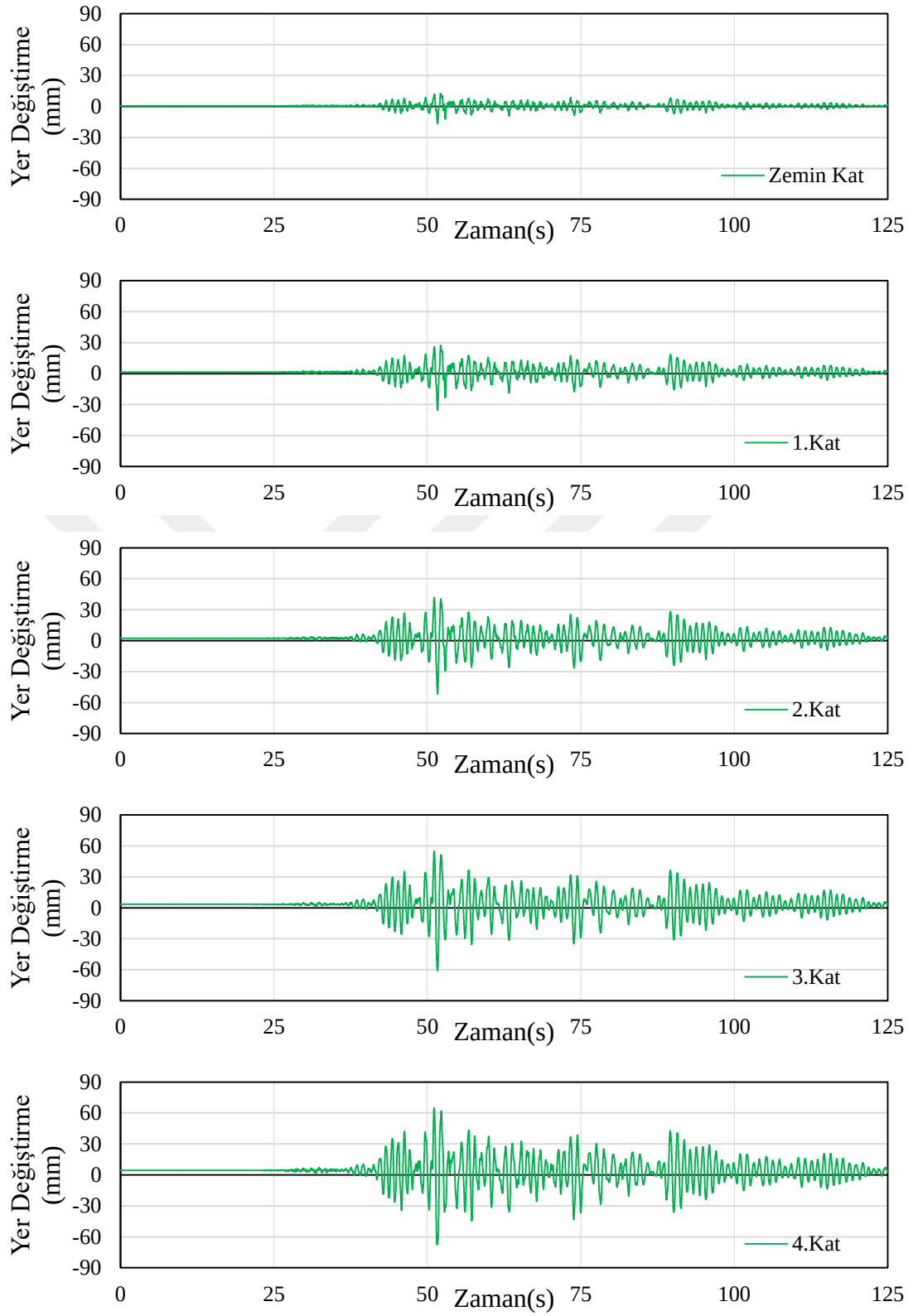
Şekil 88. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



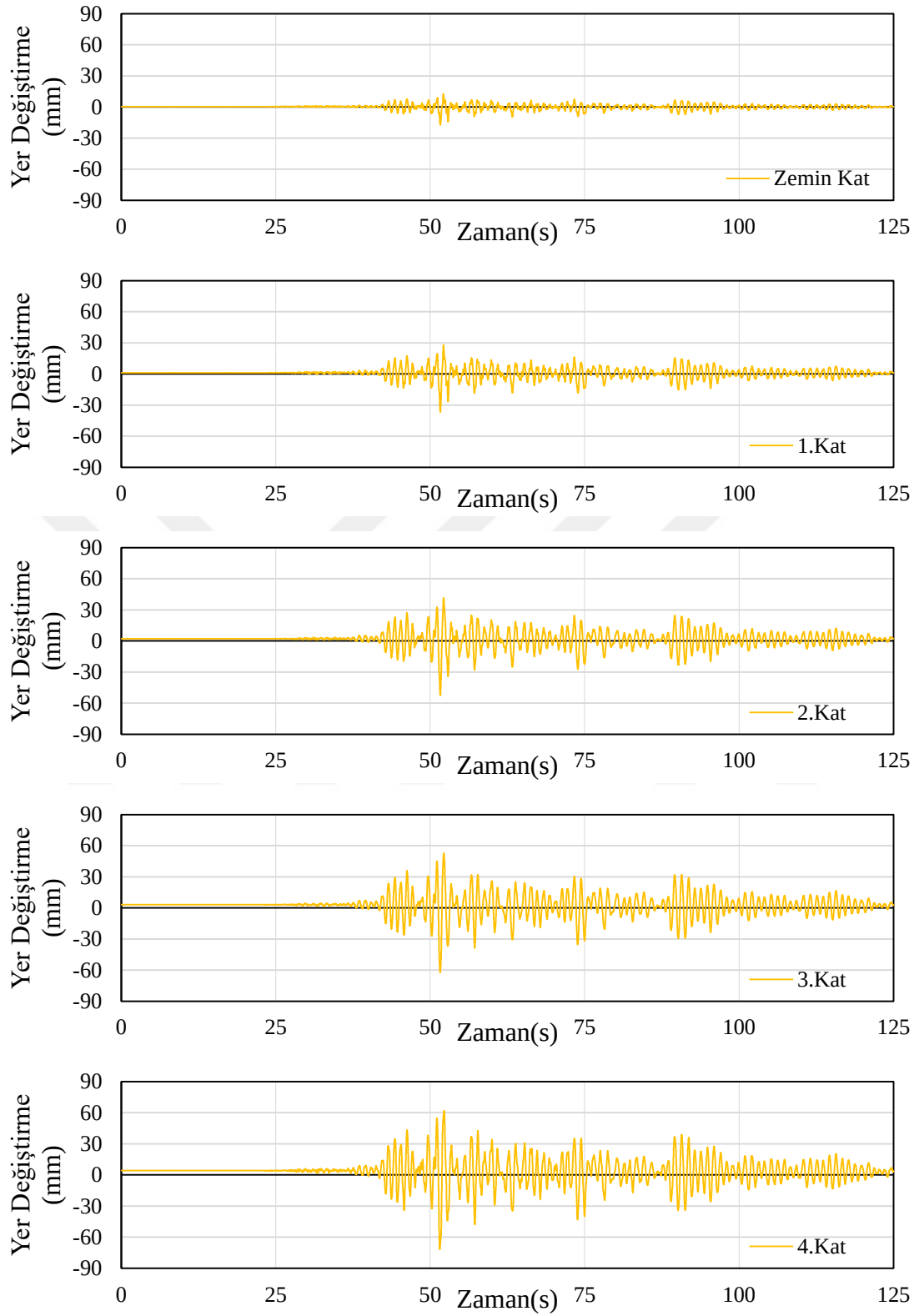
Şekil 89. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



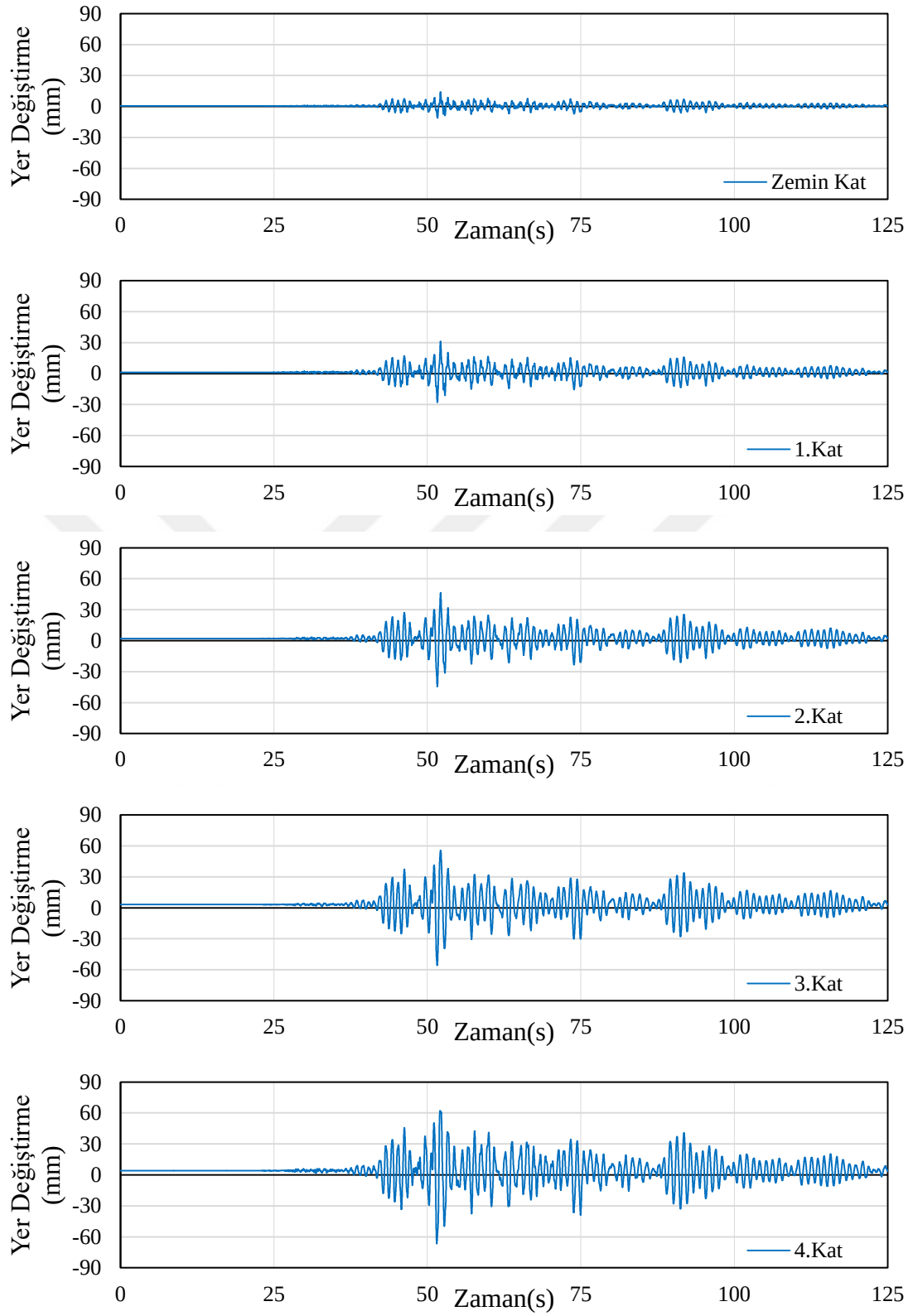
Şekil 90. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



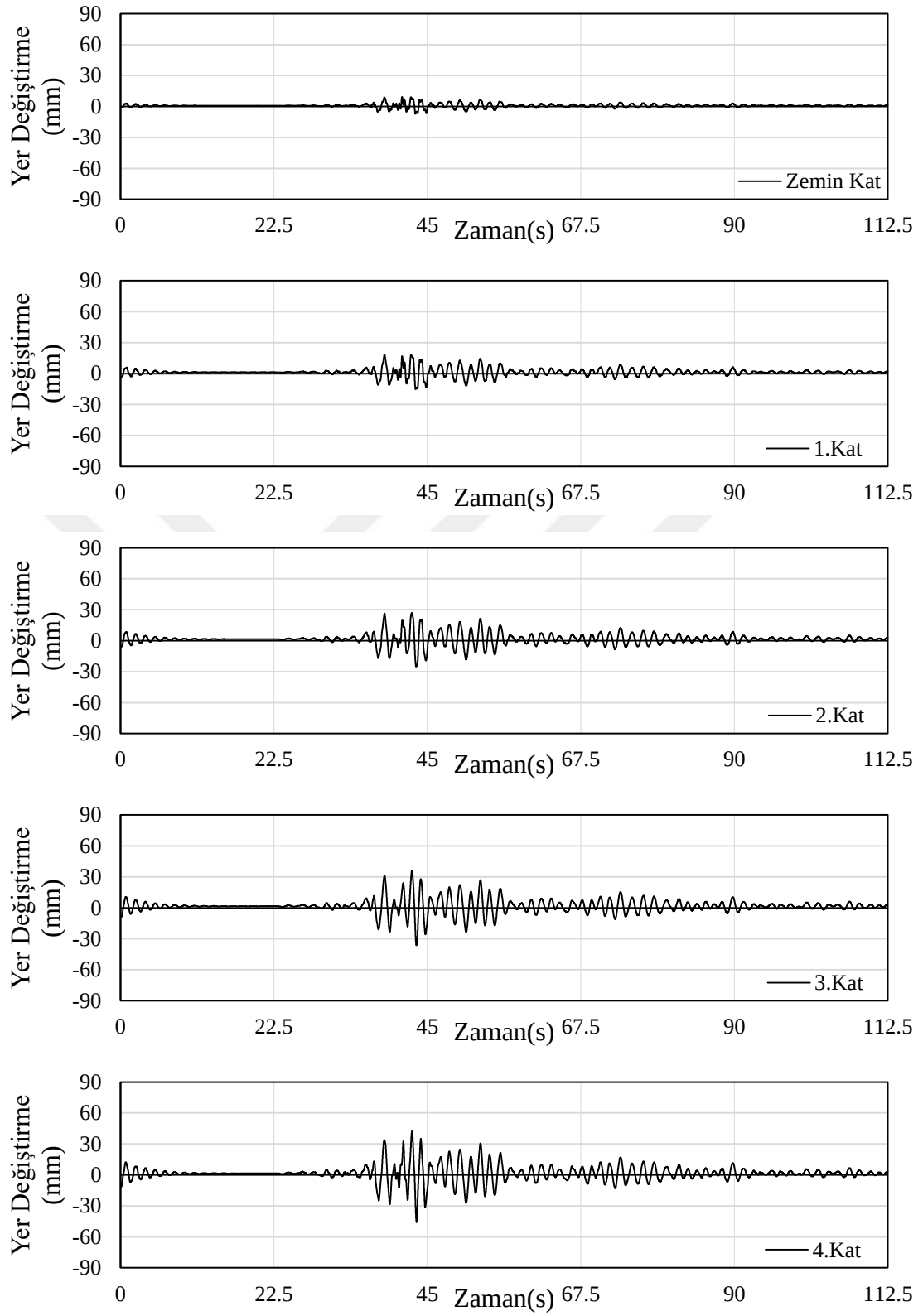
Şekil 91. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



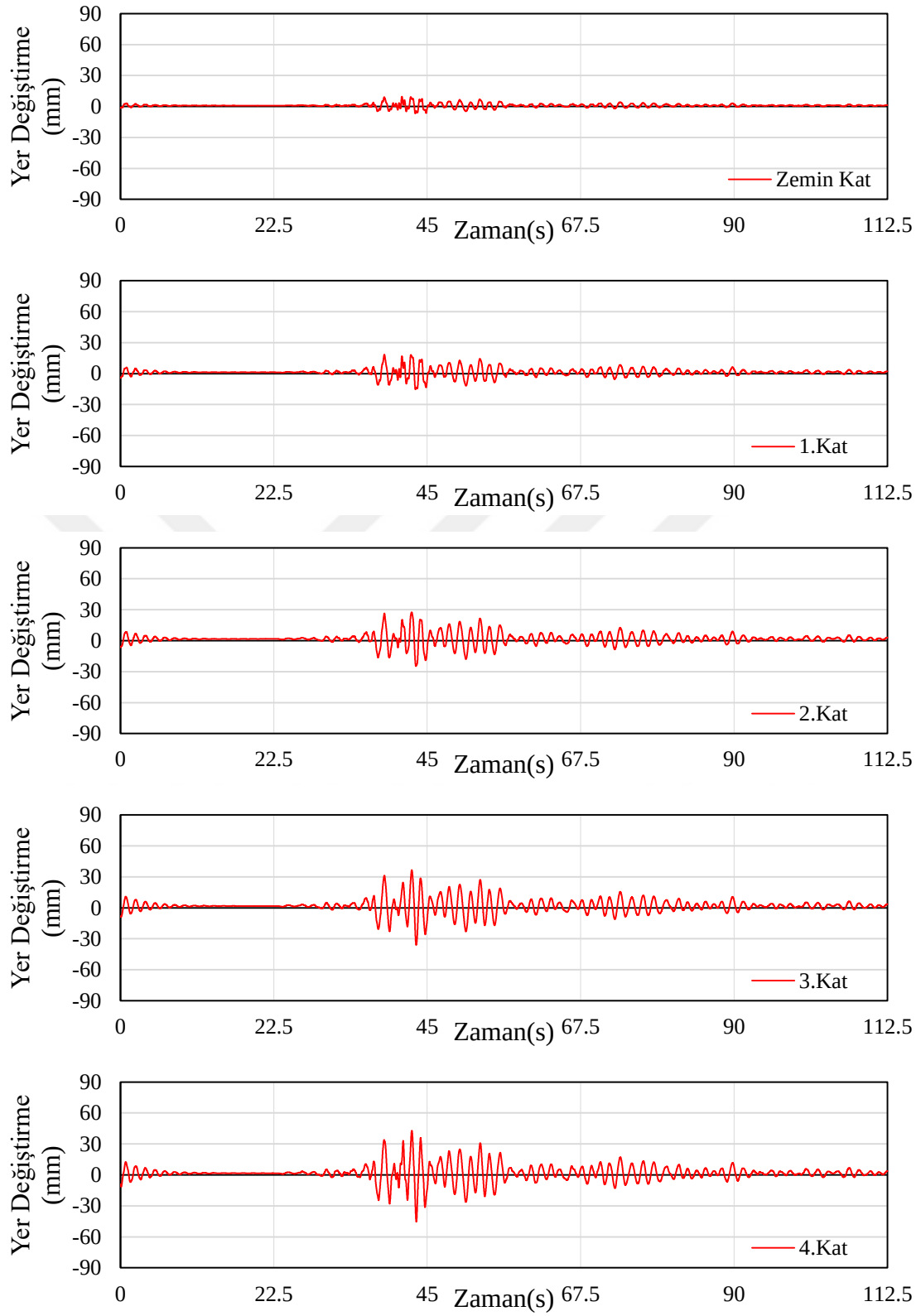
Şekil 92. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



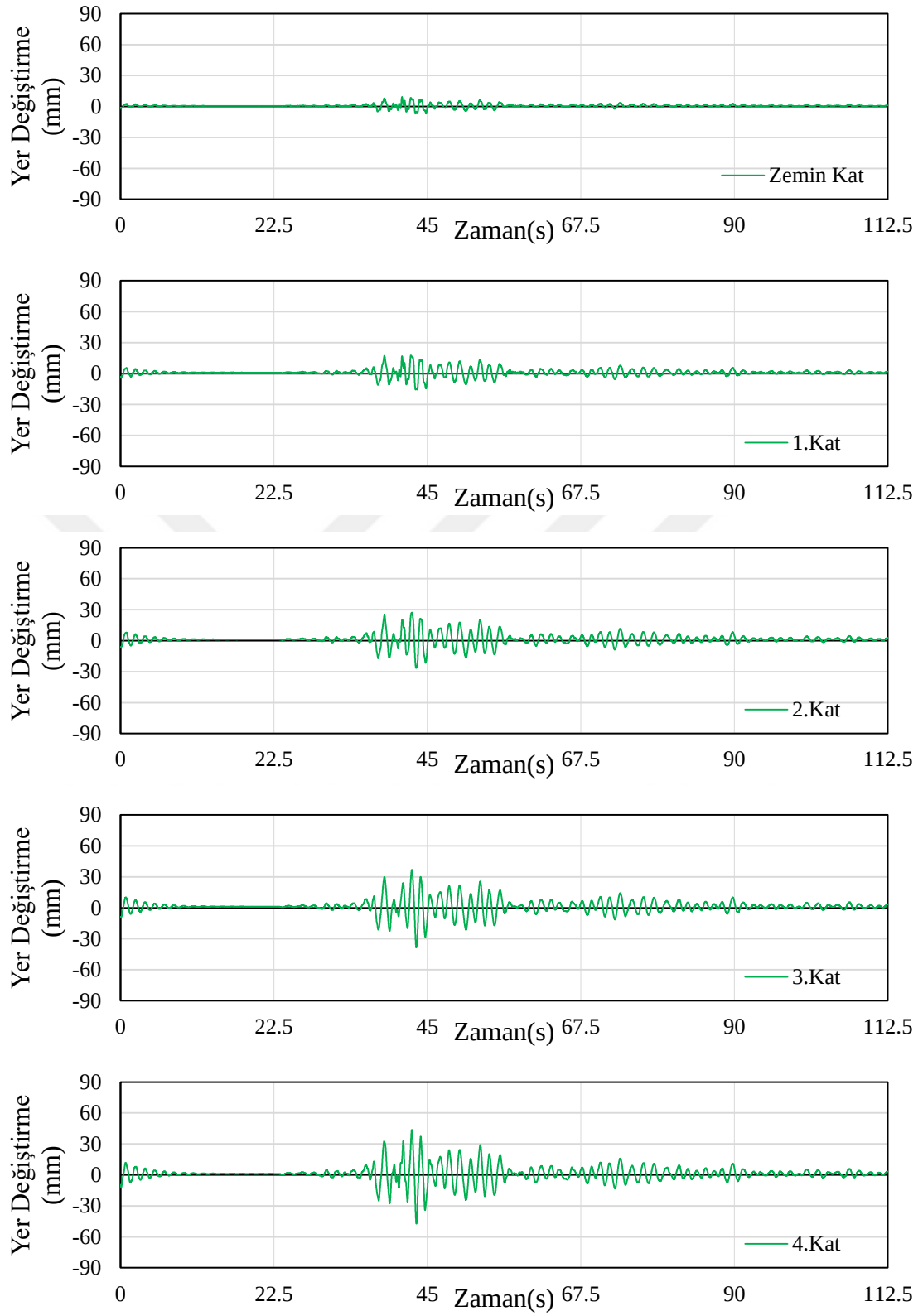
Şekil 93. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



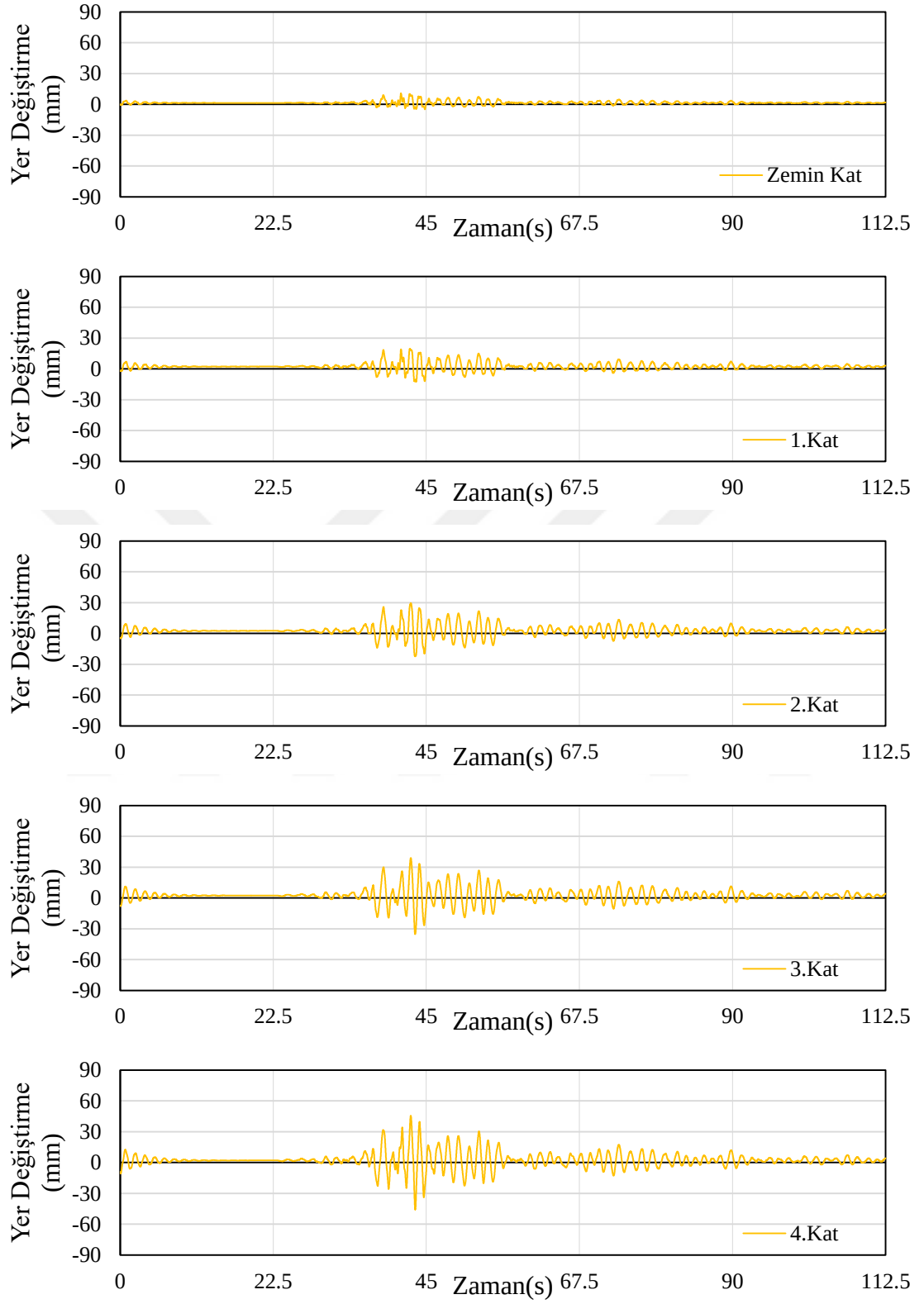
Şekil 94. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



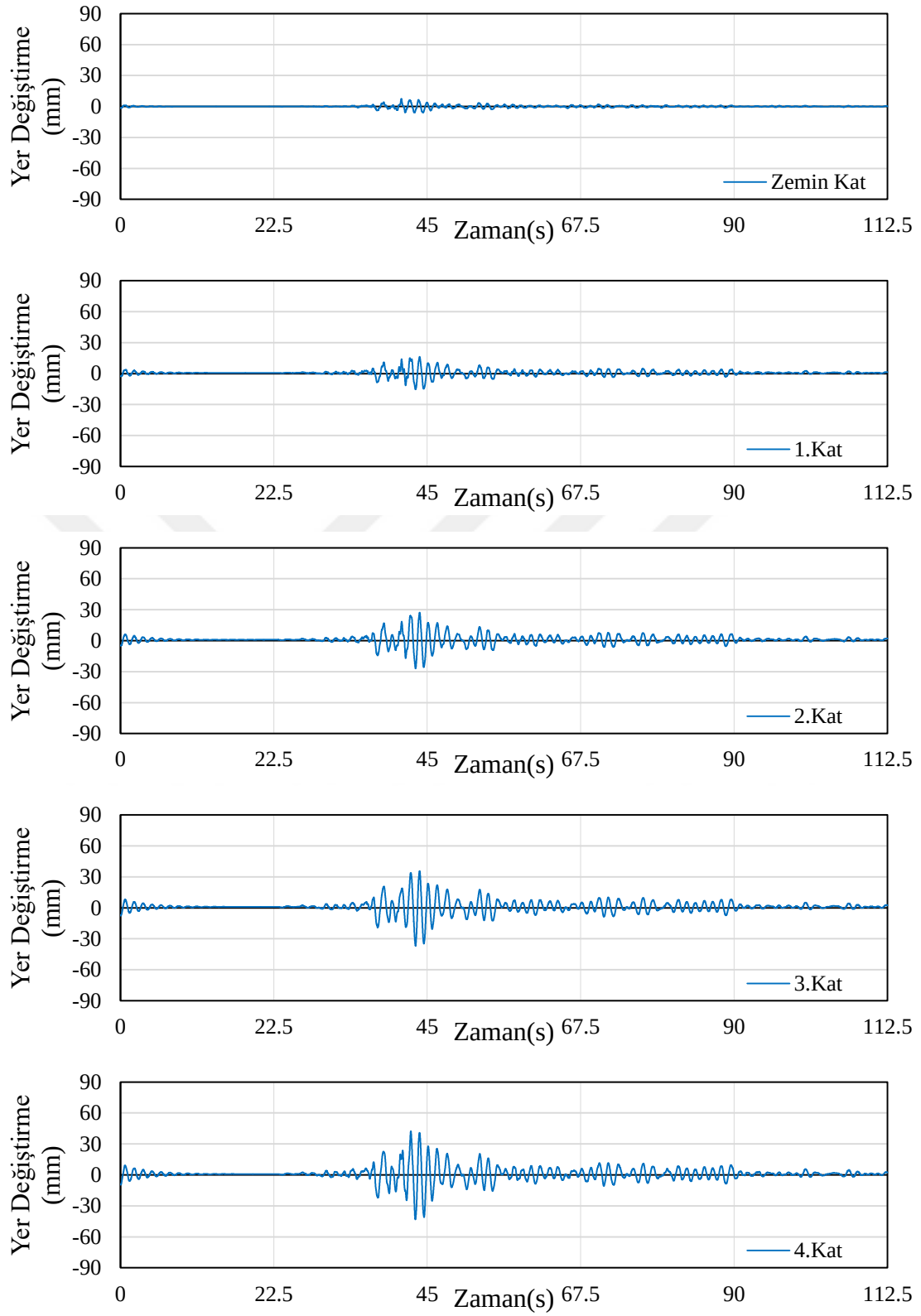
Şekil 95. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



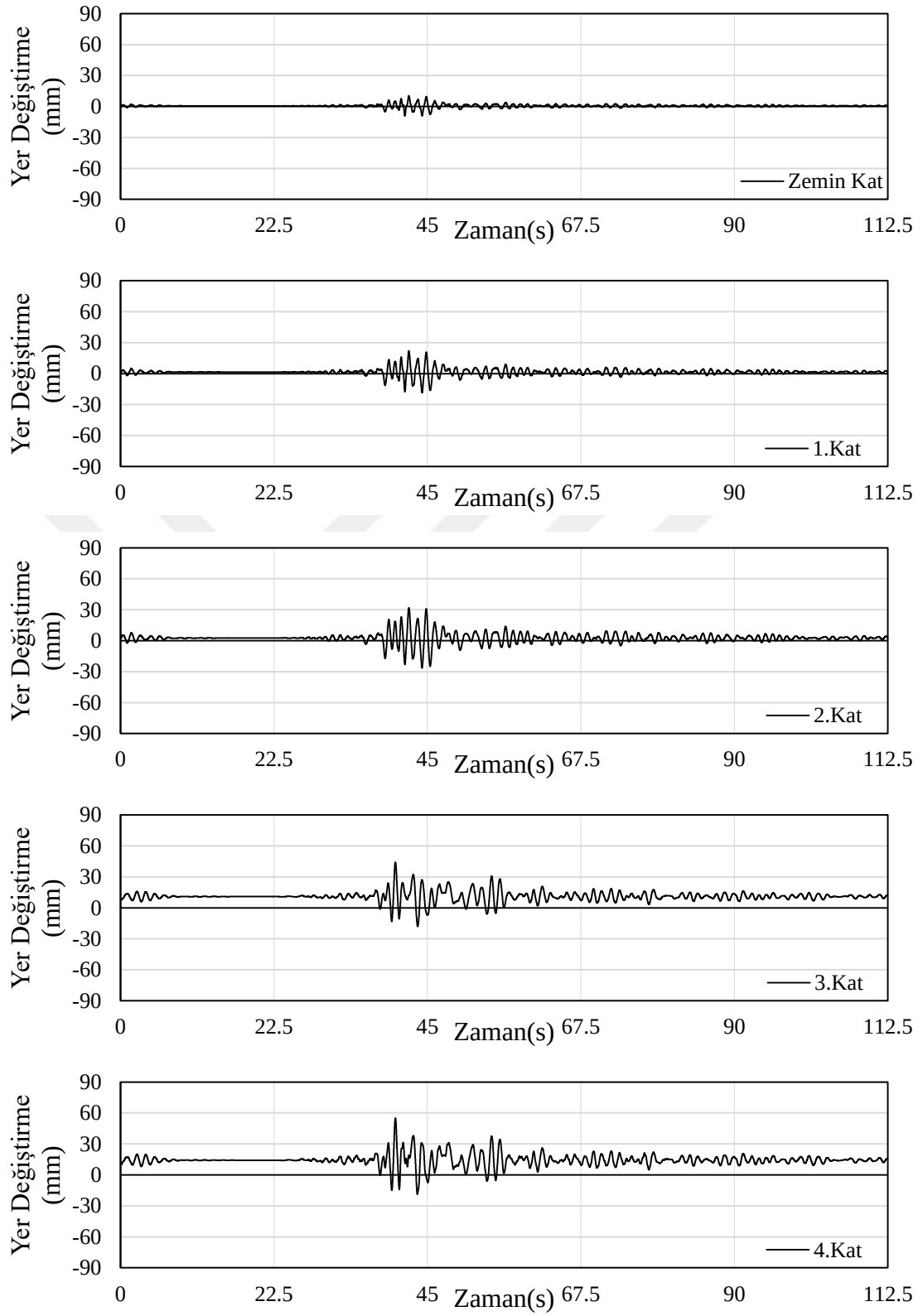
Şekil 96. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



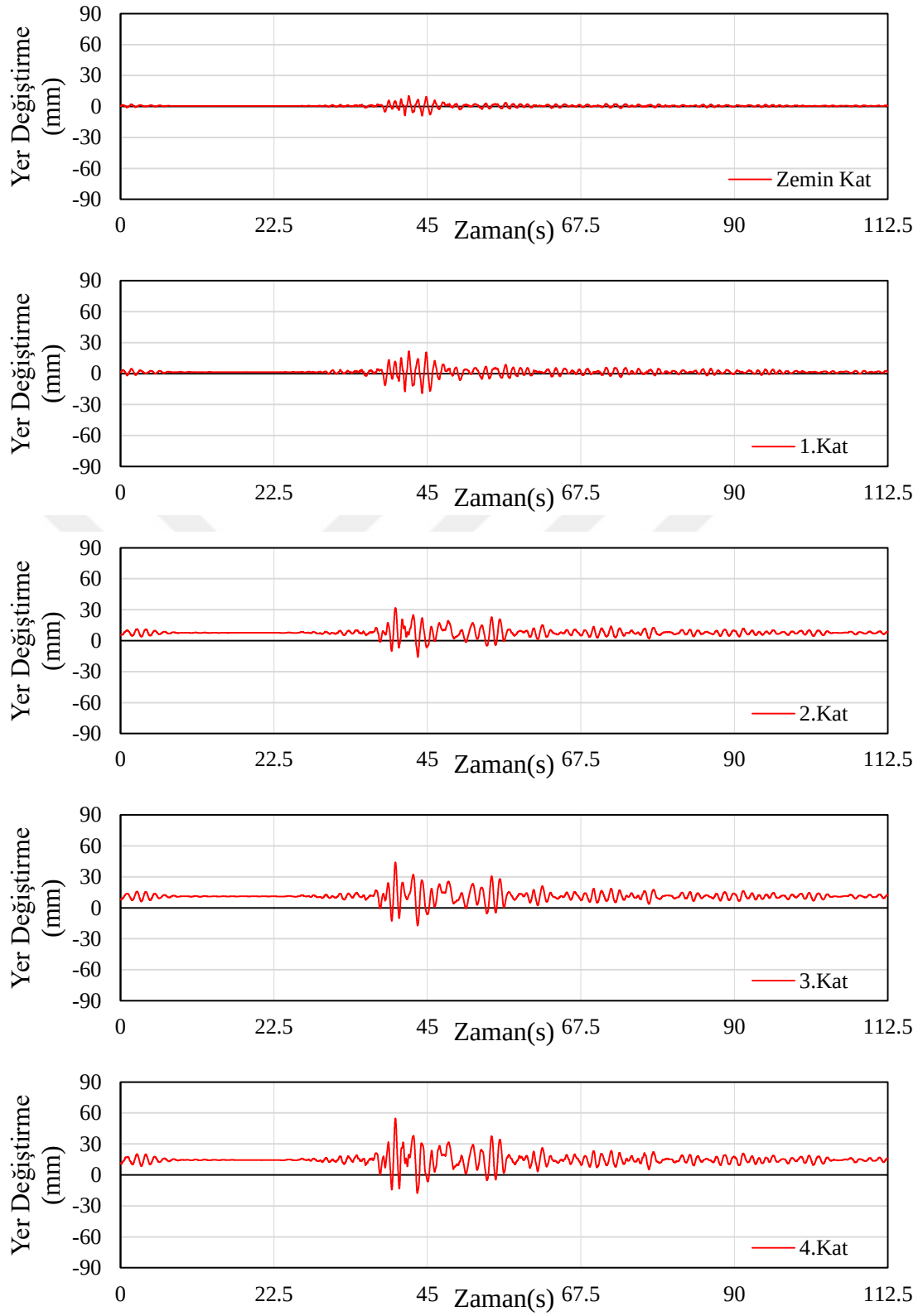
Şekil 97. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



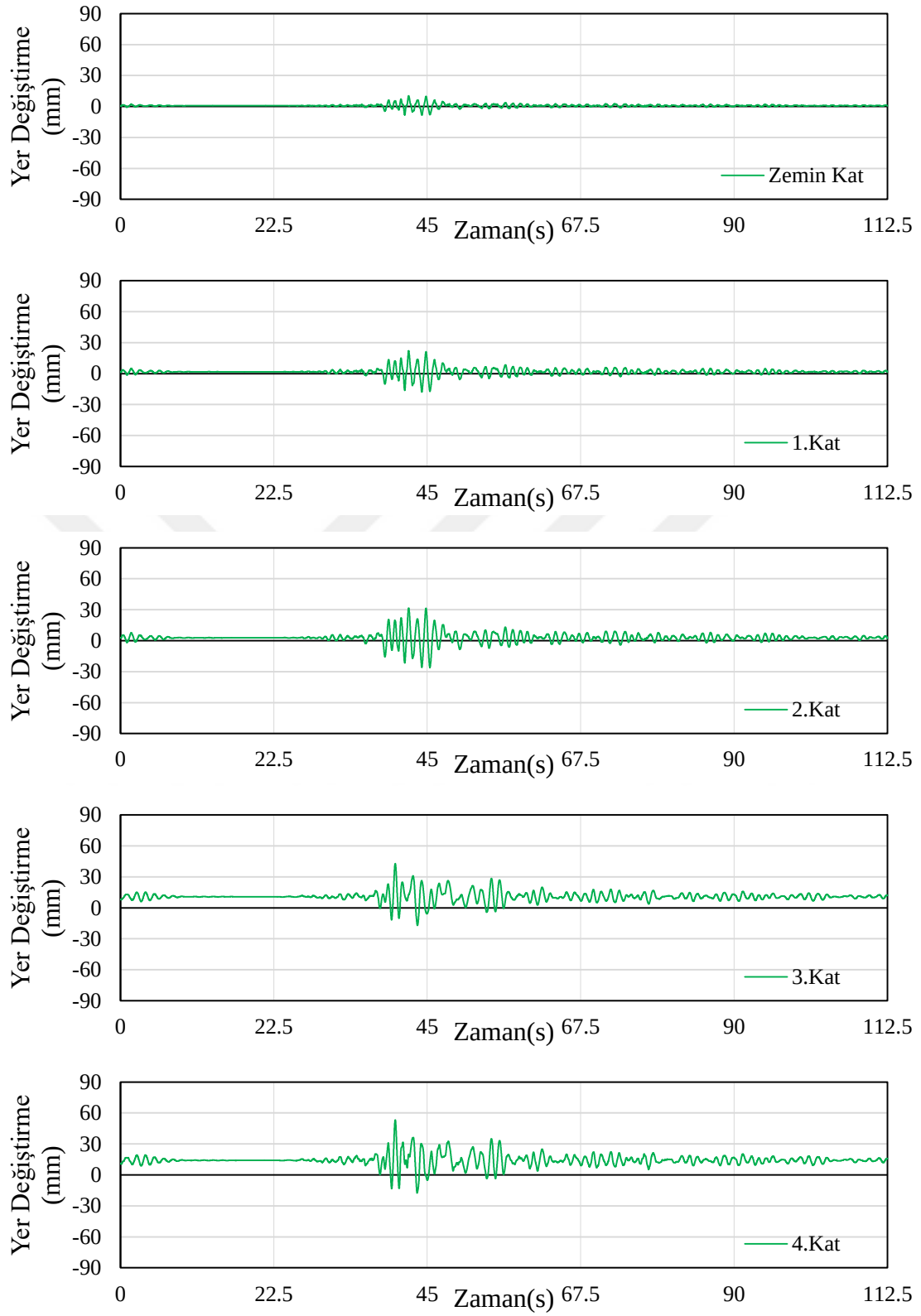
Şekil 98. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için x doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



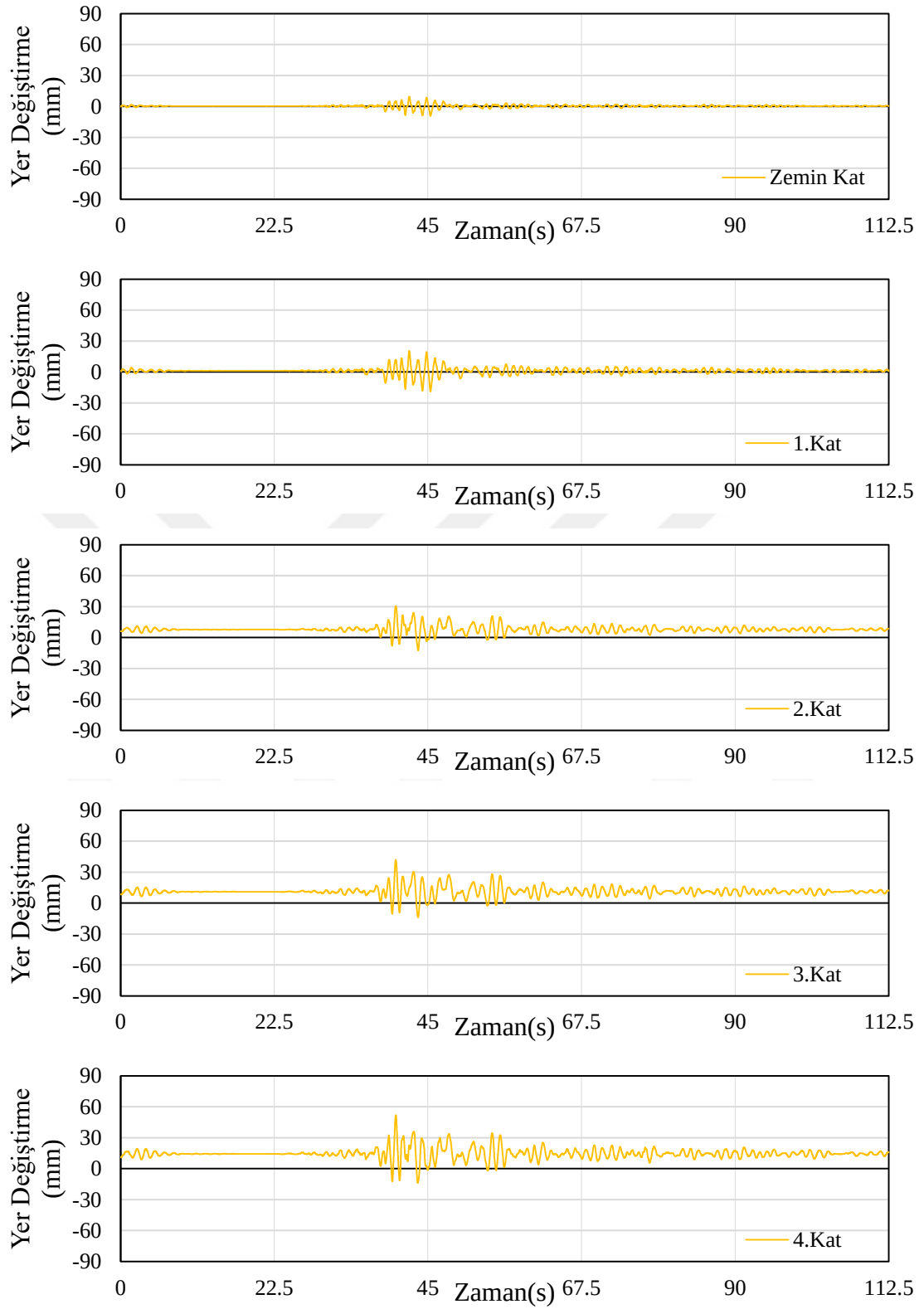
Şekil 99. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında çarpışmasız durum için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



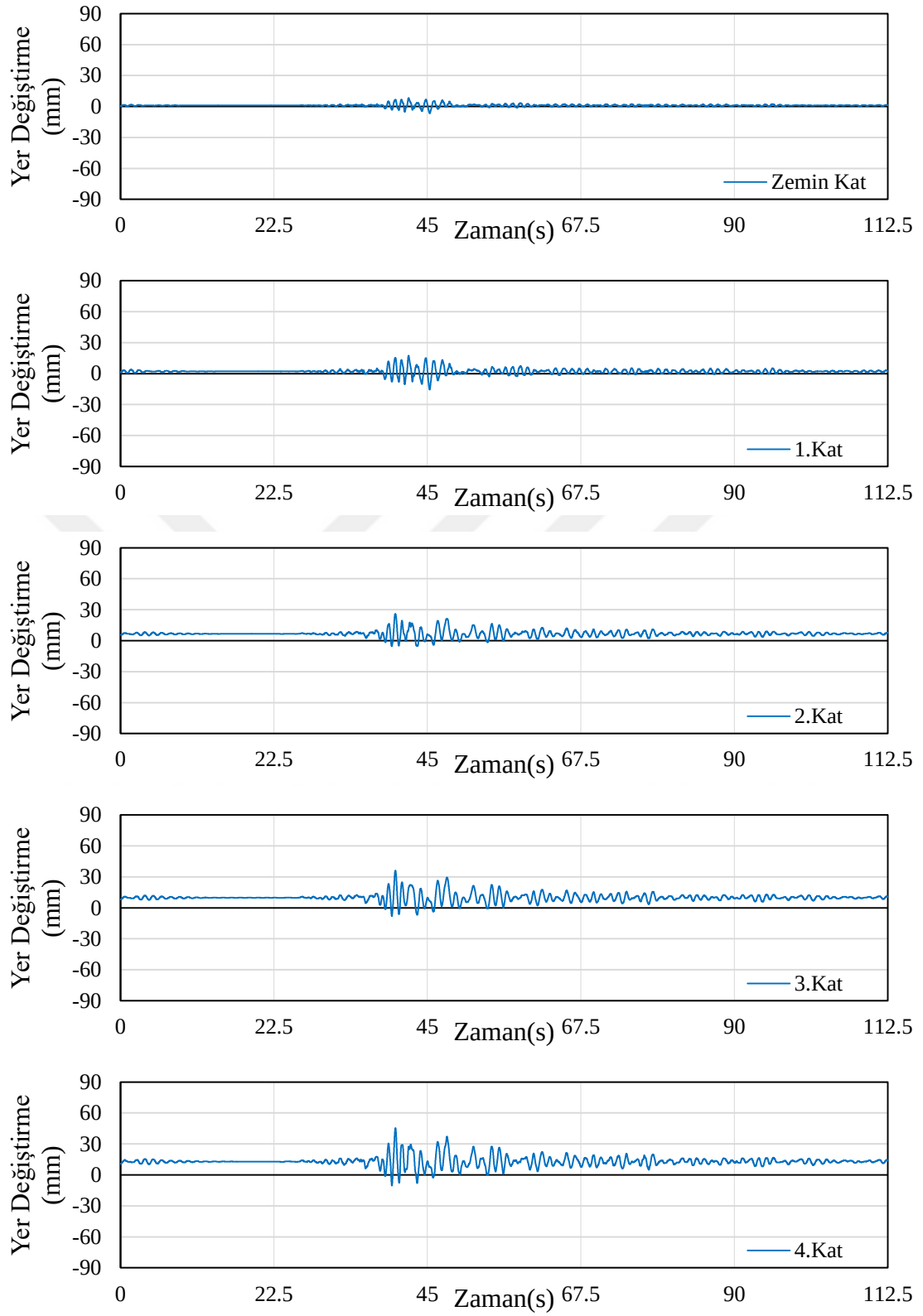
Şekil 100. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-1 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



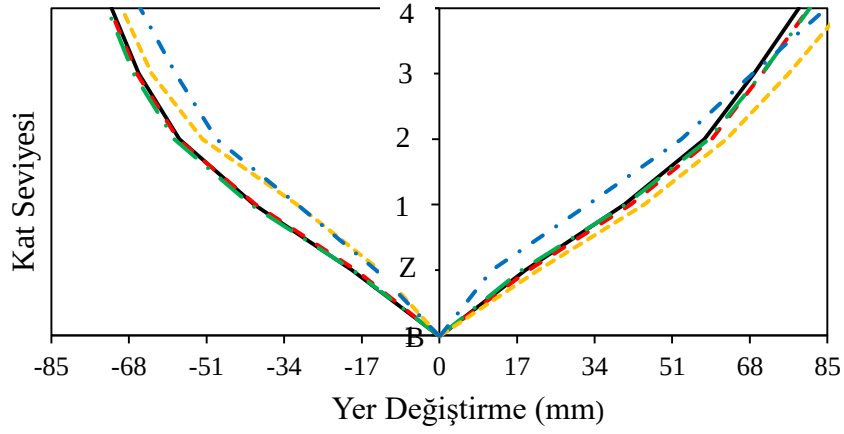
Şekil 101. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-2 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



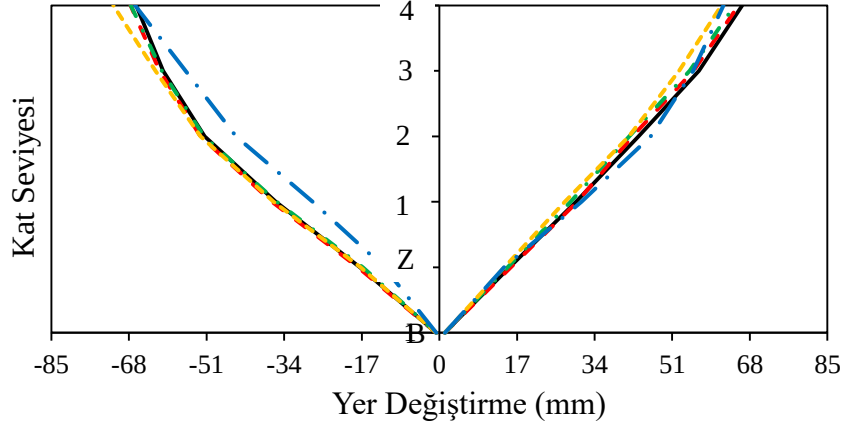
Şekil 102. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-3 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



Şekil 103. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında Durum-4 için y doğrultusunda elde edilen yer değiştirme-zaman grafikleri



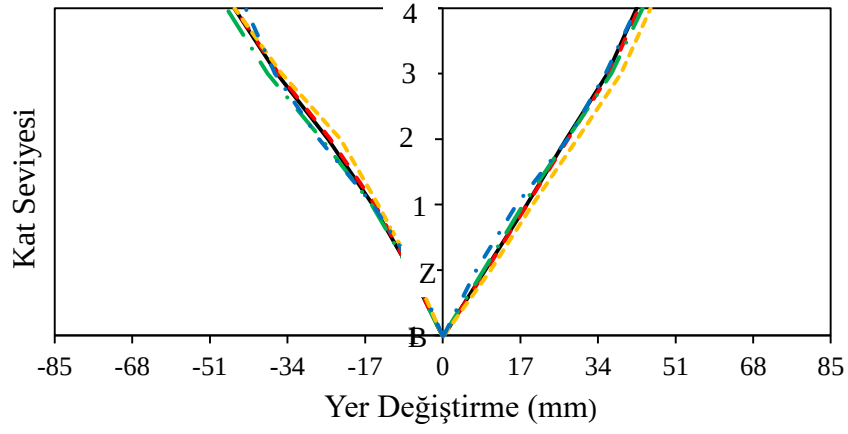
(a) x doğrultusu



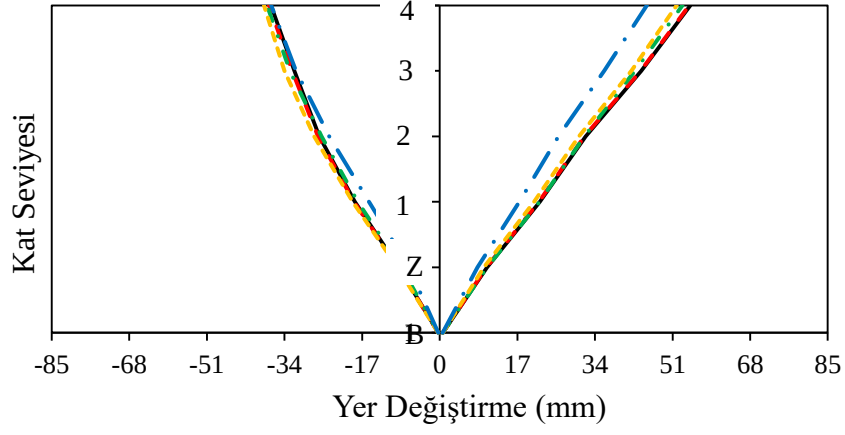
(b) y doğrultusu

— Çarpışmasız Durum - - - Durum-1 . . . Durum-2 - . - Durum-3 - - - Durum-4

Şekil 104. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinin değişimi



(a) x doğrultusu



(b) y doğrultusu

— Çarpışmasız Durum - - - Durum-1 . . . Durum-2 - . - Durum-3 - - - Durum-4

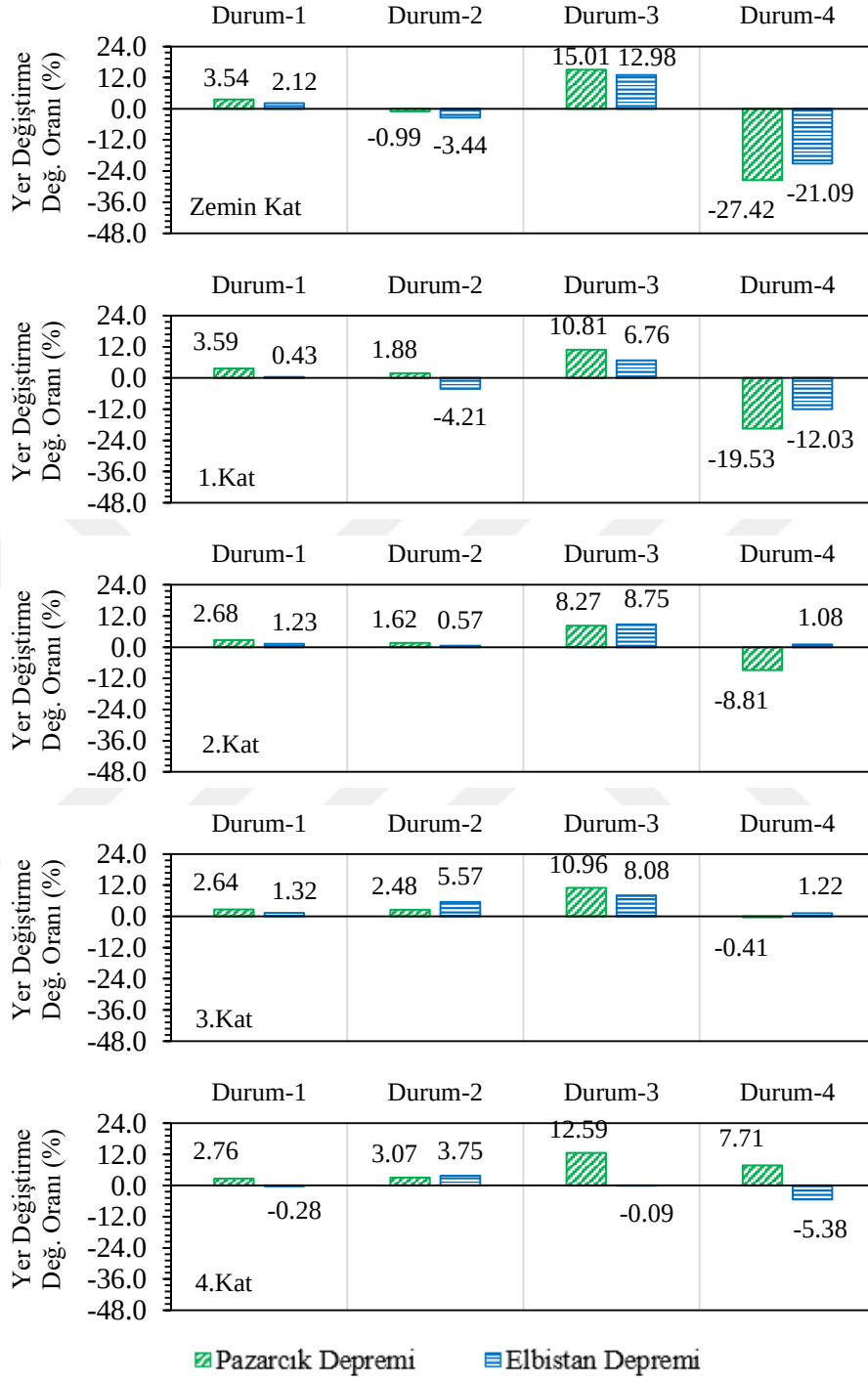
Şekil 105. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında elde edilen en büyük yer değiştirme değerlerinin değişimi

Tablo 5. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri

Senaryo/Yer Hareketi	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Pozitif Yöndeki En büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Çarpışmasız Durum	18.85	40.50	58.08	68.94	78.76
Durum-1	19.52	41.96	59.64	70.76	80.93
Durum-2	18.04	40.77	59.02	70.65	81.18
Durum-3	21.68	44.88	62.89	76.50	88.67
Durum-4	11.50	32.59	52.97	68.66	84.83
Negatif Yöndeki En büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Çarpışmasız Durum	-19.17	-40.59	-56.94	-65.86	-71.80
Durum-1	-18.32	-40.27	-57.20	-66.29	-72.26
Durum-2	-18.98	-41.35	-58.10	-66.98	-72.78
Durum-3	-13.06	-31.21	-51.90	-63.04	-69.57
Durum-4	-13.91	-31.15	-48.82	-57.82	-65.55

Tablo 6. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi altında x doğrultusunda elde edilen en büyük yer değiştirme değerleri

Senaryo/Yer Hareketi	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Pozitif Yöndeki En büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Çarpışmasız Durum	9.31	18.43	27.06	36.13	42.50
Durum-1	9.51	18.51	27.39	36.61	42.99
Durum-2	8.99	17.65	27.21	36.96	43.79
Durum-3	10.52	19.68	29.43	39.05	45.55
Durum-4	7.35	16.21	27.35	35.71	42.43
Negatif Yöndeki En büyük Yer Değiştirme Değerleri (mm)					
Çarpışmasız Durum	-7.20	-15.35	-25.12	-36.32	-45.66
Durum-1	-7.16	-14.85	-24.62	-36.01	-45.53
Durum-2	-7.21	-15.56	-26.52	-38.34	-47.37
Durum-3	-6.42	-14.20	-22.36	-35.26	-45.61
Durum-4	-6.02	-15.36	-27.08	-36.76	-43.20



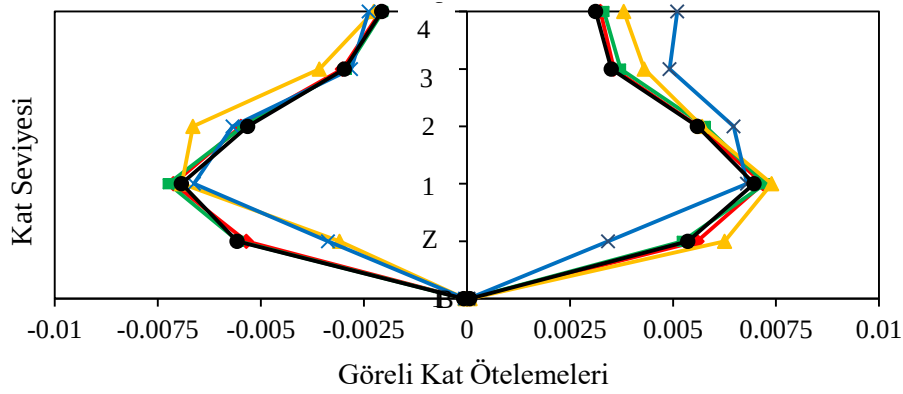
Şekil 106. Çarpışmasız duruma kıyasla en büyük yer değiştirme değerlerinde meydana gelen değişimler

3.2.5. Göreli Kat Ötelemesi

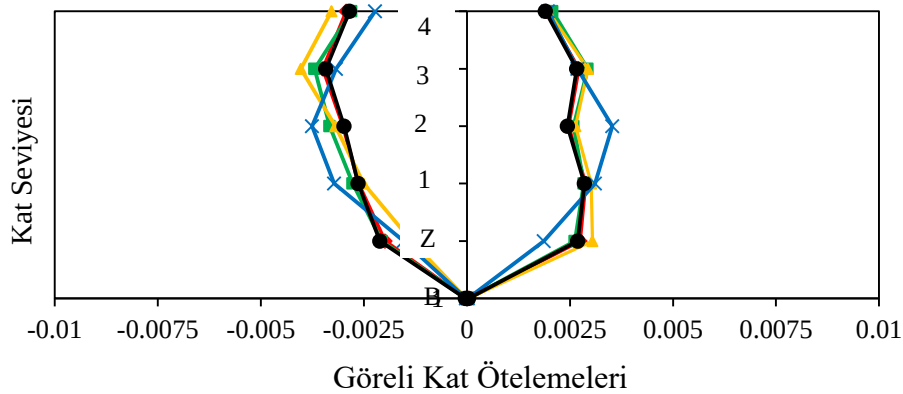
Analizler sonucunda, katlara göre elde edilen göreli kat öteleme oranları her bir deprem kaydı ve durum için karşılaştırmalı olarak Şekil 107’de sunulmuştur. Ayrıca bu katlarda elde edilen göreli kat öteleme oranları Tablo 7 ve Tablo 8’de verilmiştir. Tablo 7 ve Tablo 8 incelendiğinde, çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı durumda en büyük göreli kat öteleme oranları zemin ve 4. katlar arasında 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi için %0.56, %0.70, %0.56, %0.35 ve %0.31; Elbistan depreminde ise %0.27, %0.29, %0.30, %0.34 ve %0.28 elde edilmiştir. Kahramanmaraş depremlerindeki gerçek çarpışmayı temsil eden Durum-1 incelendiğinde ise zemin kattan itibaren elde edilen en büyük göreli kat öteleme oranları Pazarcık depremi için %0.56, %0.72, %0.56, %0.36, %0.32; Elbistan depremi için %0.27, %0.29, %0.30, %0.35, %0.29’dur. Yapının karşılıklı iki cephesinde kolon ve duvar çarpışmasının etkili olduğu Durum-2’de Pazarcık depremi sırasında göreli kat öteleme oranları %0.55, %0.72, %0.58, %0.37, %0.33 iken, Elbistan depreminde bu oranlar %0.26, %0.28, %0.33, %0.37, %0.28 olarak kaydedilmiştir. Zemin kat döşeme seviyesinde çevre duvar ile çarpışmanın gerçekleştiği Durum-3’te Pazarcık depremi için, en büyük göreli kat öteleme oranları zemin kat ve 1. katta %0.63 ve %0.74 olarak elde edilirken, 2., 3. ve 4. katlarda %0.66 ve %0.38 arasında değişmiştir. Elbistan depreminde ise katlar arasındaki göreli ötelemeler %0.20–%0.40 aralığında kalmıştır. Döşeme seviyesindeki çarpışmanın yapının iki tarafında gerçekleştiği Durum-4’te, Pazarcık depreminde göreli kat öteleme oranları %0.34–%0.68; Elbistan depreminde %0.15–%0.38 arasında elde edilmiştir.

Çarpışmasız duruma kıyasla farklı çarpışma senaryoları altındaki göreli kat öteleme oranlarının yüzdesel değişimleri hesaplanmış ve Şekil 108 ile Şekil 109’da sunulmuştur. Çarpışmanın yalnızca binanın tek cephesinde kolon seviyesinde gerçekleştiği Durum-1 ile döşeme seviyesinde meydana geldiği Durum-3’te, çarpışmanın olmadığı yönde göreli kat ötelemeleri artarken, etkileşim yönünde ise zemin katta azalmalar gözlenmiştir. Bu azalma, Durum-1’de %5.36 ve %4.76, Durum-3’te ise %44.64 ve %38.10 seviyesinde gerçekleşmiştir. Özellikle Durum-3’te, çarpışmanın gerçekleştiği zemin katta çevre duvarın yapının yatay hareketini kısıtlaması nedeniyle göreli kat öteleme oranlarında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Buna karşılık, Durum-1’de zemin kat kolonu ile çevre duvar arasında gerçekleşen çarpışmanın etkisi daha sınırlı kalmıştır. Bunun nedeni, kolon seviyesindeki çarpışmanın, döşeme gibi daha büyük bir kütlede gerçekleşen çarpışmaya kıyasla yapının genel yer değiştirme davranışını daha az etkilemesidir. Bu nedenle, Durum-

1'deki çarpışma, Durum-3'e göre üst katlardaki yer değiştirme talebini daha sınırlı artırmış ve görel kat öteleme oranları daha düşük seviyelerde kalmıştır. Çarpışmanın olmadığı pozitif yönde ise, en büyük yer ivmesinin daha büyük olduğu Pazarcık depreminde, Elbistan depremine kıyasla görel kat ötelemelerinde genel olarak daha fazla artış gözlenmiştir. Bu artışın, özellikle Durum-3 senaryosunda daha belirgin olduğu görülmektedir. Durum-4'te, döşeme seviyesinde iki cephede eşzamanlı çarpışma meydana gelmesi sonucunda, genel yer değiştirme taleplerinde çoğunlukla azalma gözlenmiştir. Ancak, bazı katlarda görel kat öteleme oranları artmıştır. Bu artış, katlardaki yer değiştirme azalmasının farklı oranlarda gerçekleşmesinden kaynaklanmakta ve bazı katlarda öteleme oranlarının artmasına neden olmaktadır.



(a) 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi



(b) 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depremi

—♦— Durum-1 —■— Durum-2 —▲— Durum-3 —×— Durum-4 —●— Çarpışmasız Durum

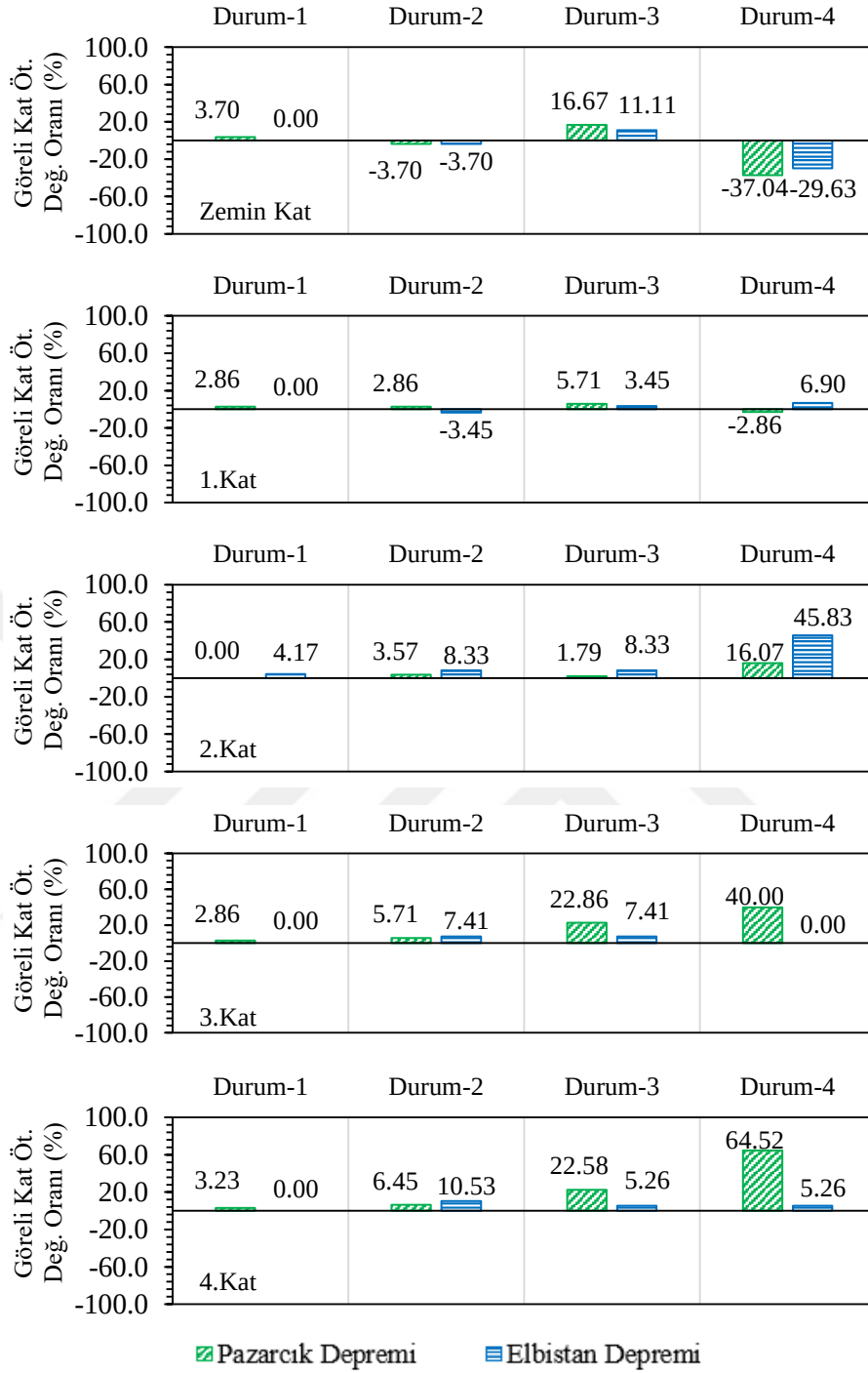
Şekil 107. Etkileşimin meydana geldiği yöndeki görel kat ötelemeleri

Tablo 7. 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depreminde elde edilen görelî kat ötelemesi oranları

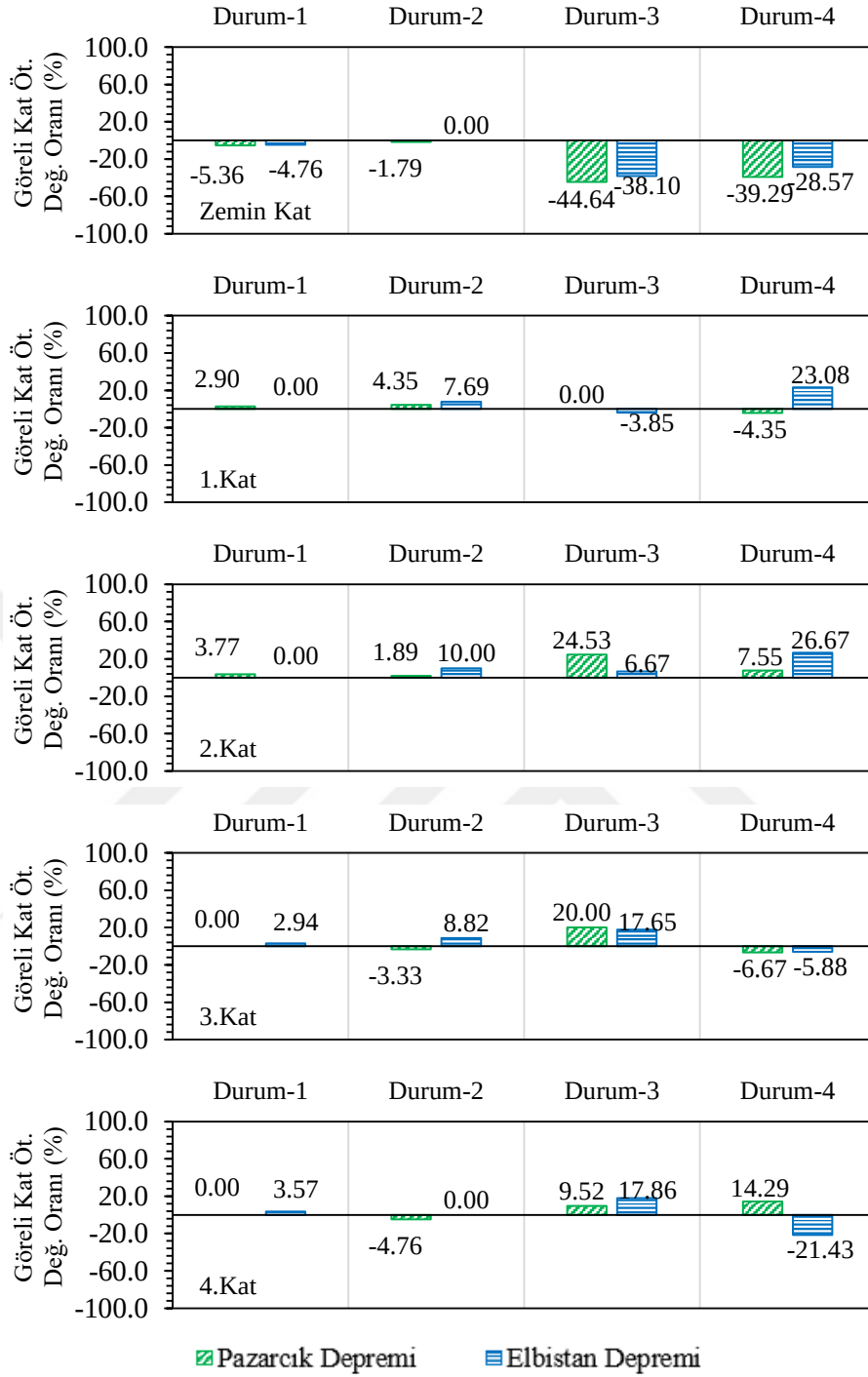
Senaryo/Yer Hareketi	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Pozitif Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Çarpışmasız Durum	0.54	0.70	0.56	0.35	0.31
Durum-1	0.56	0.72	0.56	0.36	0.32
Durum-2	0.52	0.72	0.58	0.37	0.33
Durum-3	0.63	0.74	0.57	0.43	0.38
Durum-4	0.34	0.68	0.65	0.49	0.51
Negatif Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Çarpışmasız Durum	-0.56	-0.69	-0.53	-0.30	-0.21
Durum-1	-0.53	-0.71	-0.55	-0.30	-0.21
Durum-2	-0.55	-0.72	-0.54	-0.29	-0.20
Durum-3	-0.31	-0.69	-0.66	-0.36	-0.23
Durum-4	-0.34	-0.66	-0.57	-0.28	-0.24

Tablo 8. 2023 Kahramanmaraş-Elbistan depreminde elde edilen görelî kat ötelemesi oranları

Senaryo/Yer Hareketi	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Pozitif Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Çarpışmasız Durum	0.27	0.29	0.24	0.27	0.19
Durum-1	0.27	0.29	0.25	0.27	0.19
Durum-2	0.26	0.28	0.26	0.29	0.21
Durum-3	0.30	0.30	0.26	0.29	0.20
Durum-4	0.19	0.31	0.35	0.27	0.20
Negatif Yöndeki Görelî Kat Öteleme Oranları (%)					
Çarpışmasız Durum	-0.21	-0.26	-0.30	-0.34	-0.28
Durum-1	-0.20	-0.26	-0.30	-0.35	-0.29
Durum-2	-0.21	-0.28	-0.33	-0.37	-0.28
Durum-3	-0.13	-0.25	-0.32	-0.40	-0.33
Durum-4	-0.15	-0.32	-0.38	-0.32	-0.22



Şekil 108. Pozitif yönde görelî kat ötelemelerinde meydana gelen değişimler



Şekil 109. Negatif yönde görel kat ötelemelerinde meydana gelen değişimler

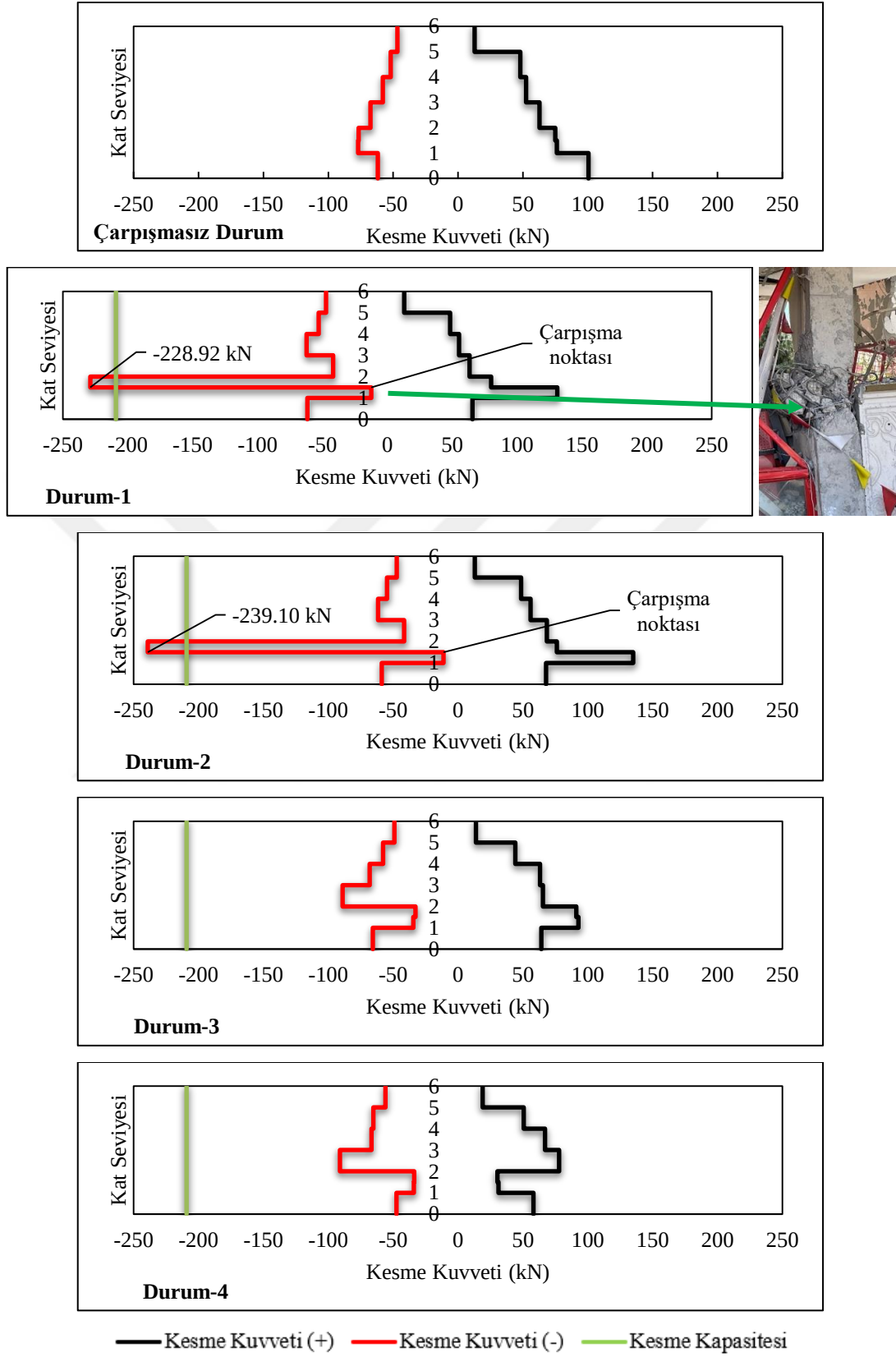
3.2.6. Kesme Kuvvetleri ve Burulma Momentleri

2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle ağır hasar alan kolon boyunca, çarpışmasız durum ve farklı çarpışma senaryoları altında, zaman tanım alanında

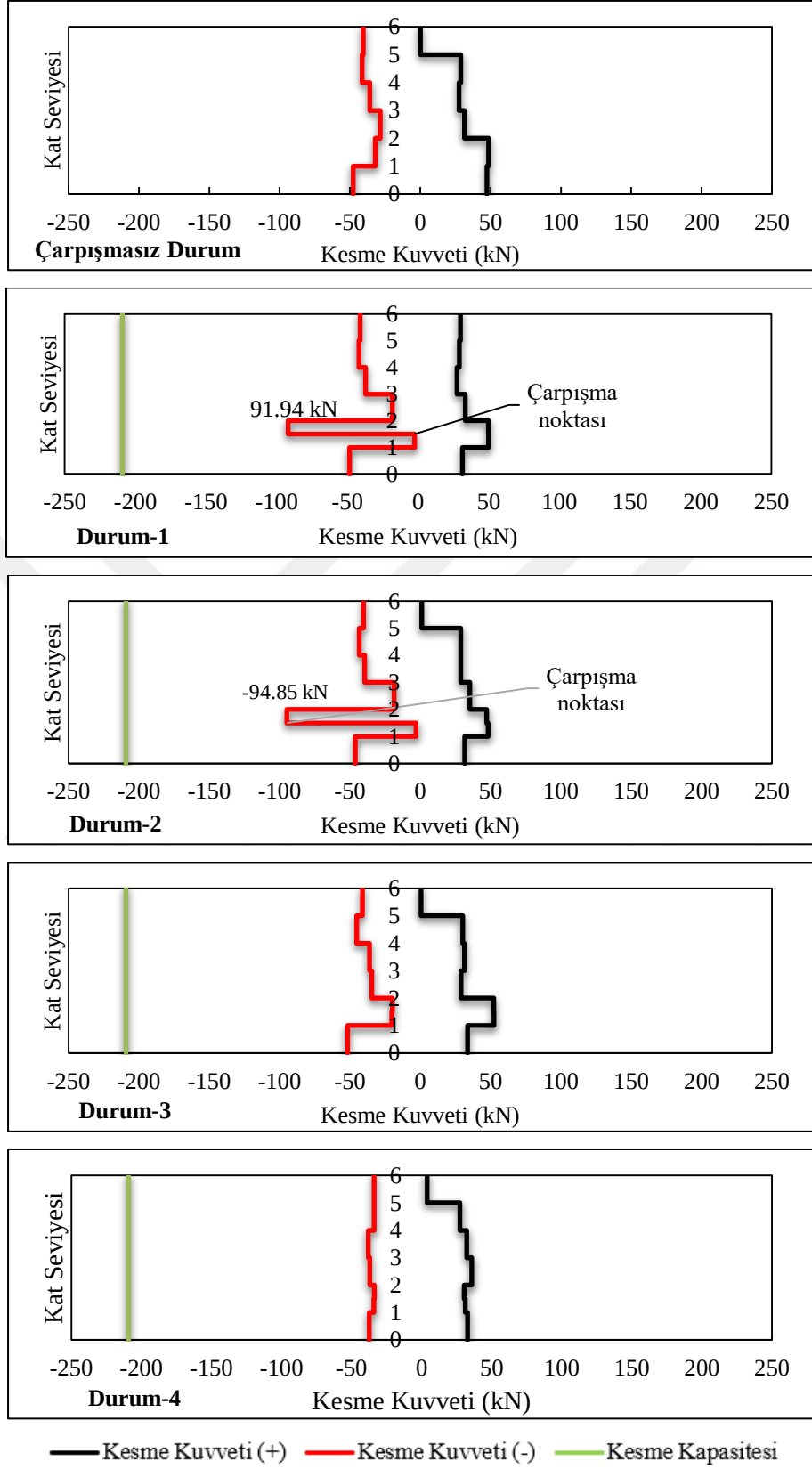
gerçekleştirilen analizler sonucunda oluşan kesme kuvveti grafikleri Şekil 110 ve Şekil 111’de sunulmuştur. Bu grafiklerden elde edilen maksimum kesme kuvveti değerleri Tablo 9’da, çarpışmasız duruma kıyasla yüzdesel değişimler ise Şekil 112’de verilmiştir. Sunulan bu grafiklerde, çarpışma bölgesi olarak adlandırılan seviye, 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında gözlenen gerçek çarpışma konumunu (Durum-1 senaryosundaki kolon-çevre duvar teması) temsil etmektedir. Ancak farklı çarpışma senaryolarında (Durum-2, Durum-3 ve Durum-4) da karşılaştırma amacıyla aynı kat seviyesindeki kesme kuvvetleri incelenmiş ve “çarpışma bölgesi” başlığı altında sunulmuştur.

Çarpışma etkilerinin dikkate alınmadığı durumda, Pazarcık depreminde kesme kuvvetleri alt katlardan üst katlara doğru azalma eğilimi göstermektedir. Elbistan depreminde ise kesme kuvvetleri ilk depreme kıyasla daha düşük olup, çarpışma bölgesinden uzaklaştıkça değişim sınırlı kalmıştır. Gerçek çarpışma durumunu temsil eden Durum-1’de özellikle çarpışma bölgesinde kesme kuvvetleri, çarpışmasız duruma kıyasla Pazarcık depreminde yaklaşık %197.3 artarak 228.92 kN’a, Elbistan depreminde ise %89.37 artarak 91.94 kN’a ulaşmıştır. Alt ve üst katlardaki değişimler ise görece sınırlıdır. Kolon ve çevre duvarın binanın her iki cephesinde çarpıştığı Durum-2’de çarpışma bölgesinde kesme kuvveti, Pazarcık depreminde yaklaşık %210.6 artarak 239.10 kN’a, Elbistan depreminde ise %95.37 artarak 94.85 kN’a ulaşmıştır. Döşeme ile çevre duvar arasında tek taraflı çarpışmanın tanımlandığı Durum-3’te, üst katlara çıkıldıkça kesme kuvvetlerindeki artış oranı Durum-1 ve Durum-2’ye göre belirgin olmuştur. Bu durum, döşeme seviyesindeki çarpışmanın ivme değişimlerini daha fazla tetiklemeinden kaynaklanmaktadır. Kolon-çevre duvar çarpışmasının her iki cephede gerçekleştiği Durum-4’te alt katlarda kesme kuvvetlerinde azalma gözlenirken, üst katlarda bazı artışlar meydana gelmiştir.

Bu sonuçlar, çarpışma etkilerinin etkileşim meydana geldiği bölgede kesme kuvvetlerinde çok yüksek artışlara neden olabileceğini göstermektedir. Nitekim gerçekleştirilen analizlerde, kolon çarpışmasının dikkate alındığı Durum-1 ve Durum-2’de çarpışma nedeniyle oluşan kesme kuvvetleri, etkileşimin meydana geldiği kolonlardaki kesme kuvveti kapasitesini aşmıştır. Öte yandan, döşeme seviyesinde gerçekleşen çarpışmalar (Durum-3 ve Durum-4), kolon seviyesindeki çarpışmalara (Durum-1 ve Durum-2) kıyasla daha fazla ivme değişimi ve buna bağlı olarak eleman bazında olmasa da kat kesme kuvvetleri bazında daha büyük artışlar veya azalışlar üretmiştir. Bu bulgu, çarpışmanın konumunun ve gerçekleşme biçiminin kritik etkiler doğurabileceğini ortaya koymaktadır.



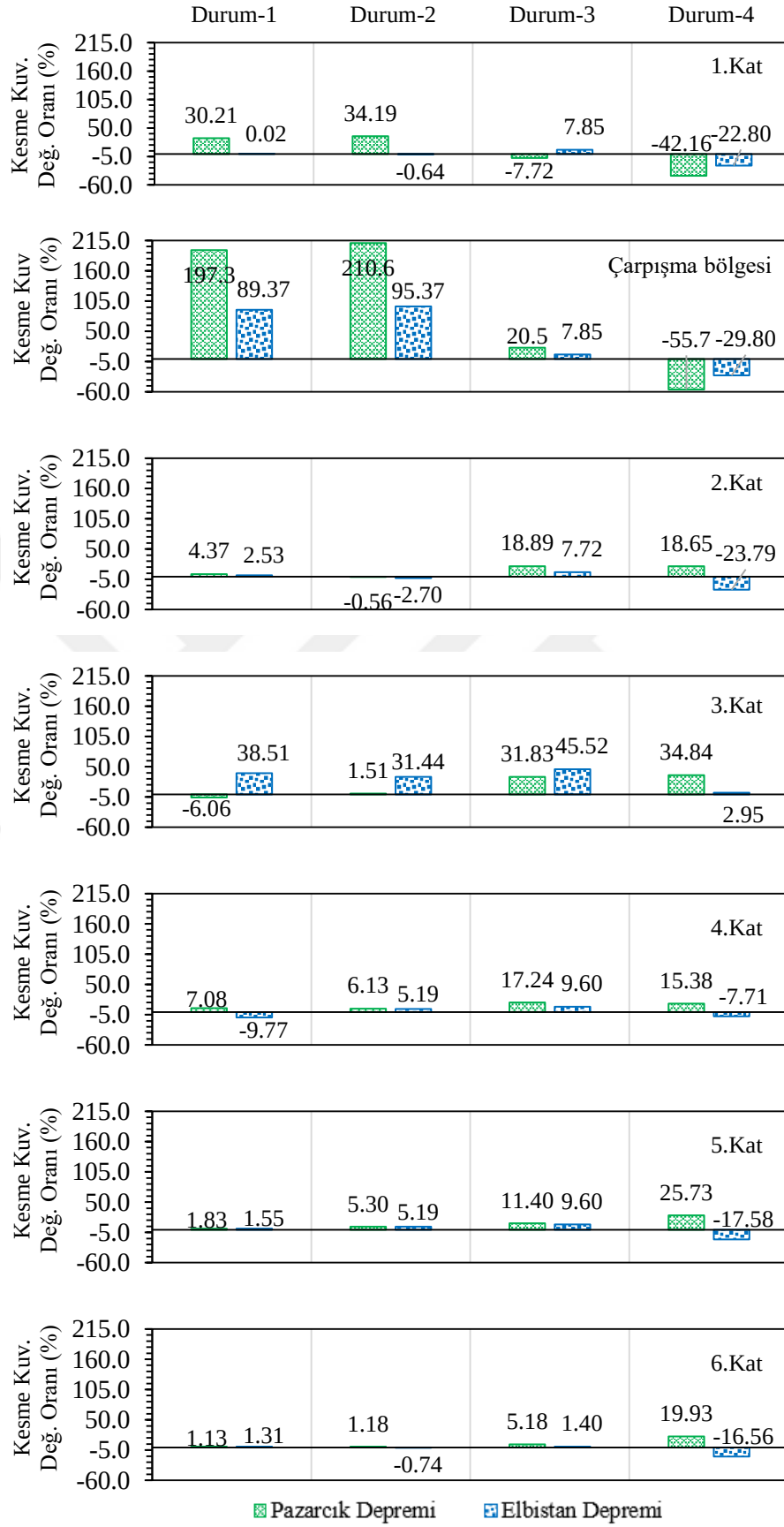
Şekil 110. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca kesme kuvvetinde meydana gelen değişimler (Pazarcık depremi)



Şekil 111. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca kesme kuvvetinde meydana gelen değişimler (Elbistan depremi)

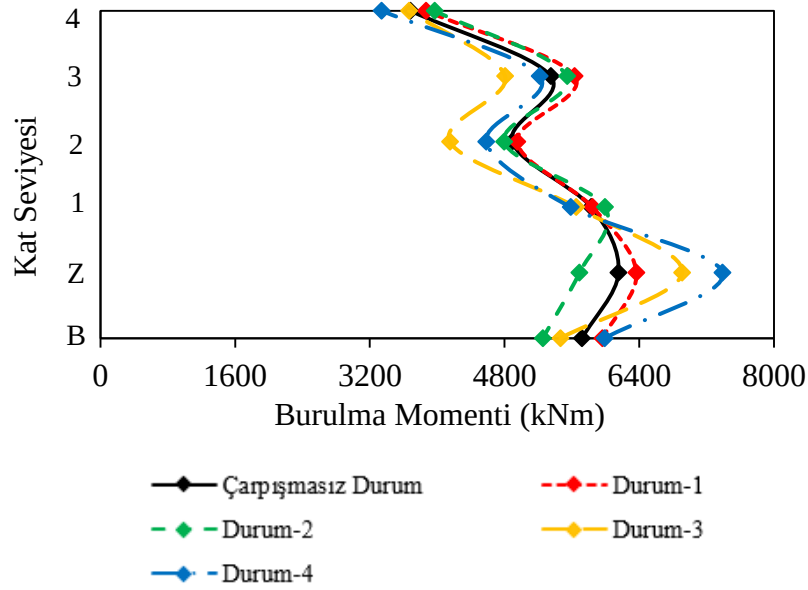
Tablo 9. 2023 Kahramanmaraş depremlerinde hasar gören kolon boyunca elde edilen en büyük kesme kuvveti değerleri (kN)

2023 Kahramanmaraş-Pazarcık Depremi							
	1.Kat	Çarpışan Bölge	2. Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat	6.Kat
Çarpışmasız Durum	100.56	76.99	76.69	67.48	58.06	51.92	46.72
Durum-1	130.94	228.92	80.04	63.39	62.17	52.87	47.25
Durum-2	134.99	239.10	76.26	68.50	61.62	54.67	47.27
Durum-3	92.80	92.80	91.18	88.96	68.07	57.84	49.14
Durum-4	58.16	34.08	90.99	90.99	66.99	65.28	56.03
2023 Kahramanmaraş-Elbistan Depremi							
	1.Kat	Çarpışan Bölge	2. Kat	3.Kat	4.Kat	5.Kat	6.Kat
Çarpışmasız Durum	48.55	48.55	48.55	35.94	41.24	41.24	40.57
Durum-1	49.39	91.94	49.78	33.46	37.21	41.88	41.10
Durum-2	48.24	94.85	47.24	39.54	43.38	43.38	40.27
Durum-3	52.36	52.36	52.30	36.12	45.20	45.20	41.14
Durum-4	37.48	34.08	37.00	38.06	38.06	33.99	33.85

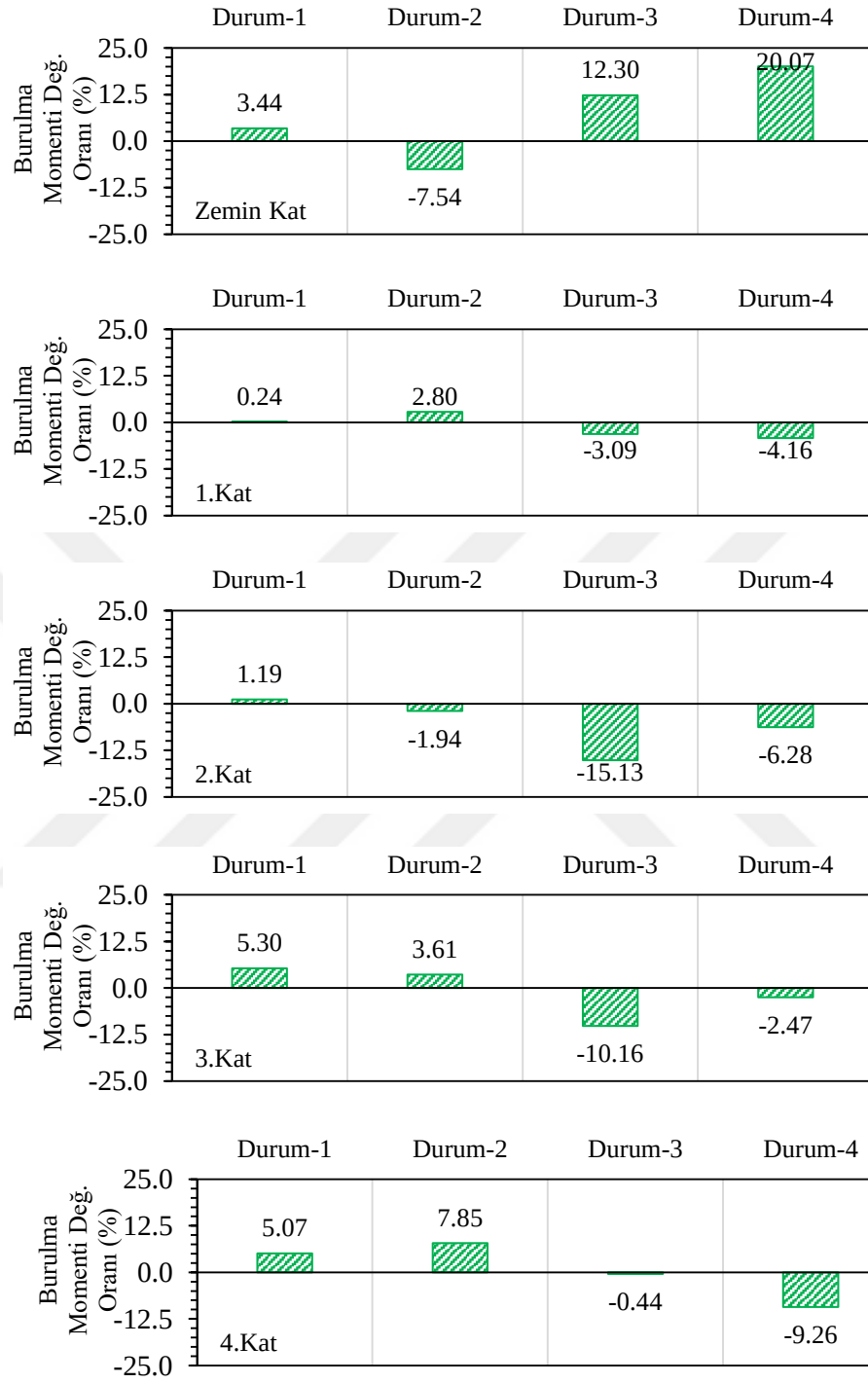


Şekil 112. Dikkate alınan kolondaki en büyük kesme kuvveti değerlerindeki değişimler

Analizler sonucu burulma momentinin kat seviyelerine göre değişimi her bir durum için 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremi altında incelenmiştir. Şekil 113'ten görüleceği üzere, kat burulma momentlerinde çarpışma nedeniyle artışlar meydana gelmiştir. Döşeme seviyelerinde meydana gelen çarpışmalar kat burulma momentlerinde belirgin artışlara neden olmuştur. Şekil 114'te burulma momentlerindeki artış ve azalış oranları sunulmuştur. Durum-1'de burulma momentlerinde %0.24 ile %5.30 arasında artış gözlenmiştir. Durum-2'de ise zemin katta %7.54 ve 2. katta %1.94 oranında azalma meydana gelirken, 1., 3. ve 4. katlarda sırasıyla %2.80, %3.61 ve %7.85 oranında artış tespit edilmiştir. Durum-3 ve Durum-4'te zemin katta sırasıyla %12.30 ve %20.07'ye varan artışlar gözlemlenmiştir. Buna karşın, 1.-4. katlarda burulma momentleri Durum-3'te %0.44 ile %15.13 arasında, Durum-4'te ise %2.47 ile %9.26 arasında azalma göstermiştir.



Şekil 113. Kat seviyelerine göre burulma momentlerinin değişimi



Şekil 114. Çarpışmanın burulma momentleri üzerindeki etkisi

3.2.7. Taşıyıcı Sistemin Performans Seviyesi

TBDY-2018'e göre doğrusal olmayan davranış, yığılı ve yayılı plastik davranış modeli olmak üzere iki farklı şekilde temsil edilebilir. Bu çalışmada, seçilen yapının doğrusal olmayan davranışını daha gerçekçi bir şekilde temsil edebilmek amacıyla yayılı plastik davranış modeli tercih edilmiştir ve bu modele göre performans değerlendirmeleri yapılmıştır.

Yönetmeliğe göre, yayılı plastik davranış modelinin kullanıldığı durumlarda, taşıyıcı sistem elemanlarının performans seviyelerinin belirlenmesinde beton ve donatı çeliği için birim şekil değiştirme değerleri kullanılmalıdır. TBDY-2018, Bölüm 15.8'de mevcut binaların performans değerlendirmesi için dört farklı performans düzeyi tanımlanmıştır: (i) Sınırlı Hasar (SH) Performans Düzeyi, (ii) Kontrollü Hasar (KH) Performans Düzeyi, (iii) Göçmenin Önlenmesi (GÖ) Performans Düzeyi ve (iv) Göçme Durumu. TBDY-2018'de belirlenen performans seviyeleri için sınır birim şekil değiştirmeler, Denklem 3-5'te yer almaktadır.

Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyi için:

$$\begin{aligned}\varepsilon_c^{(GÖ)} &= 0.0035 + 0.04\sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \\ \varepsilon_s^{(GÖ)} &= 0.4\varepsilon_{su}\end{aligned}\quad (3)$$

Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyi için:

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_c^{(GÖ)}; \varepsilon_s^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_s^{(GÖ)} \quad (4)$$

Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi için:

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025; \varepsilon_s^{(KH)} = 0.0075 \quad (5)$$

Taşıyıcı sistem elemanlarının analizler sonucunda elde edilen performans seviyeleri Tablo 10-14'te sunulmuştur. Taşıyıcı sistem elemanlarının performans seviyesi dağılımı ise yüzdesel olarak Şekil 115-117'de sunulmuştur. Ayrıca, dikkate alınan tüm senaryolarda oluşan plastik mafsalları da Şekil 118-121'de sunulmuştur.

Tablo 10. Çarpışmasız durum için analizler sonucunda belirlenen performans seviyeleri

Katlar	Bodrum Kat	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Toplam giriş adedi:	18	55	55	55	55	55
Göçme bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki giriş adedi	0	2	2	2	2	0
SH bölgesindeki giriş adedi	18	53	53	53	53	55
Toplam kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Göçme bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Toplam perde adedi	3	3	3	3	3	3
Göçme bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki perde adedi	3	3	3	3	3	3

Tablo 11. Durum-1 için analizler sonucunda belirlenen performans seviyeleri

Katlar	Bodrum Kat	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Toplam giriş adedi:	18	55	55	55	55	55
Göçme bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki giriş adedi	0	1	0	0	0	0
KH bölgesindeki giriş adedi	0	2	2	2	2	0
SH bölgesindeki giriş adedi	18	52	53	53	53	55
Toplam kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Göçme bölgesindeki kolon adedi	0	1	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki kolon adedi	17	16	17	17	17	17
Toplam perde adedi	3	3	3	3	3	3
Göçme bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki perde adedi	3	3	3	3	3	3

Tablo 12. Durum-2 için analizler sonucunda belirlenen performans seviyeleri

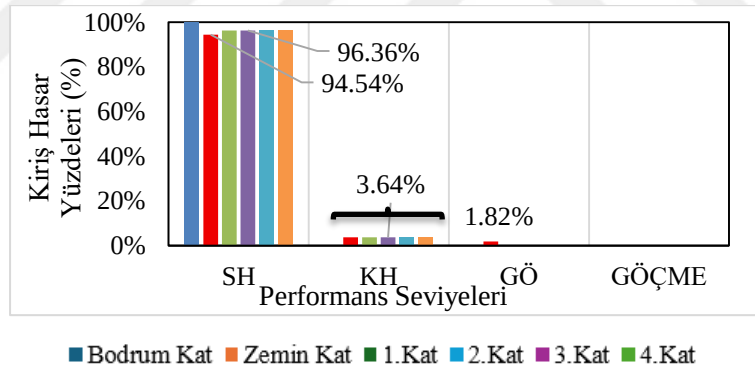
Katlar	Bodrum Kat	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Toplam giriş adedi:	18	55	55	55	55	55
Göçme bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki giriş adedi	0	1	0	0	0	0
KH bölgesindeki giriş adedi	0	2	2	2	2	0
SH bölgesindeki giriş adedi	18	52	53	53	53	55
Toplam kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Göçme bölgesindeki kolon adedi	0	2	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki kolon adedi	17	15	17	17	17	17
Toplam perde adedi	3	3	3	3	3	3
Göçme bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki perde adedi	3	3	3	3	3	3

Tablo 13. Durum-3 için analizler sonucunda belirlenen performans seviyeleri

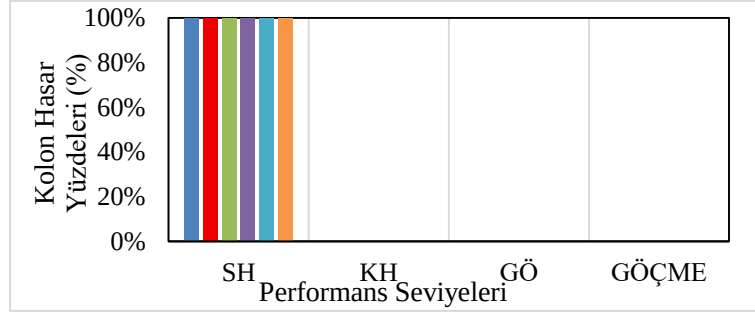
Katlar	Bodrum Kat	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Toplam giriş adedi:	18	55	55	55	55	55
Göçme bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki giriş adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki giriş adedi	0	2	2	2	2	0
SH bölgesindeki giriş adedi	18	53	53	53	53	55
Toplam kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Göçme bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Toplam perde adedi	3	3	3	3	3	3
Göçme bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki perde adedi	3	3	3	3	3	3

Tablo 14. Durum-4 için analizler sonucunda belirlenen performans seviyeleri

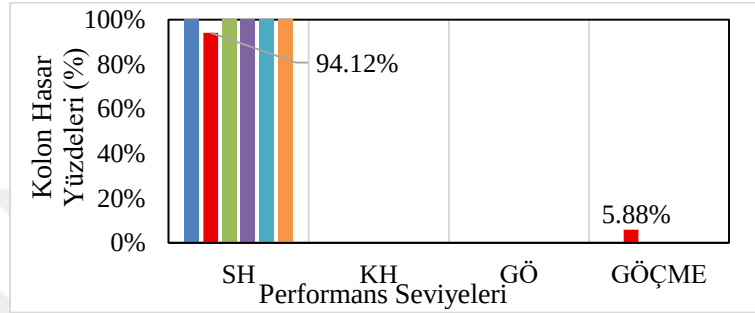
Katlar	Bodrum Kat	Zemin Kat	1.Kat	2.Kat	3.Kat	4.Kat
Toplam kiriş adedi:	18	55	55	55	55	55
Göçme bölgesindeki kiriş adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kiriş adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kiriş adedi	0	2	2	2	2	0
SH bölgesindeki kiriş adedi	18	53	53	53	53	55
Toplam kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Göçme bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki kolon adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki kolon adedi	17	17	17	17	17	17
Toplam perde adedi	3	3	3	3	3	3
Göçme bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
GÖ bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
KH bölgesindeki perde adedi	0	0	0	0	0	0
SH bölgesindeki perde adedi	3	3	3	3	3	3



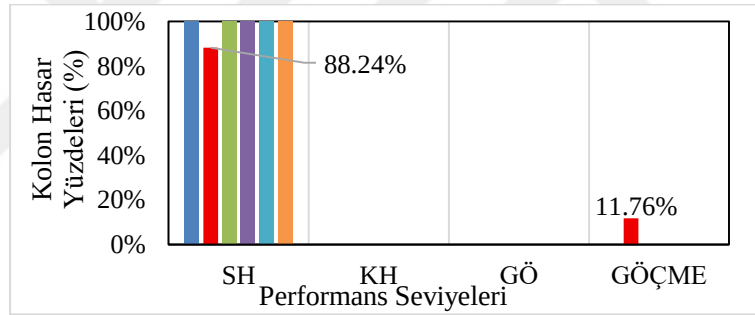
Şekil 115. Doğrusal olmayan analizler sonucunda kirişlerdeki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı



(a) Çarpışmasız Durum, Durum-3 ve Durum-4



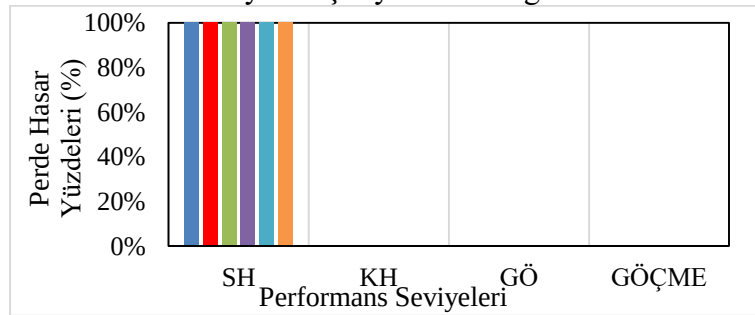
(b) Durum-1



(c) Durum-2

■ Bodrum Kat ■ Zemin Kat ■ 1.Kat ■ 2.Kat ■ 3.Kat ■ 4.Kat

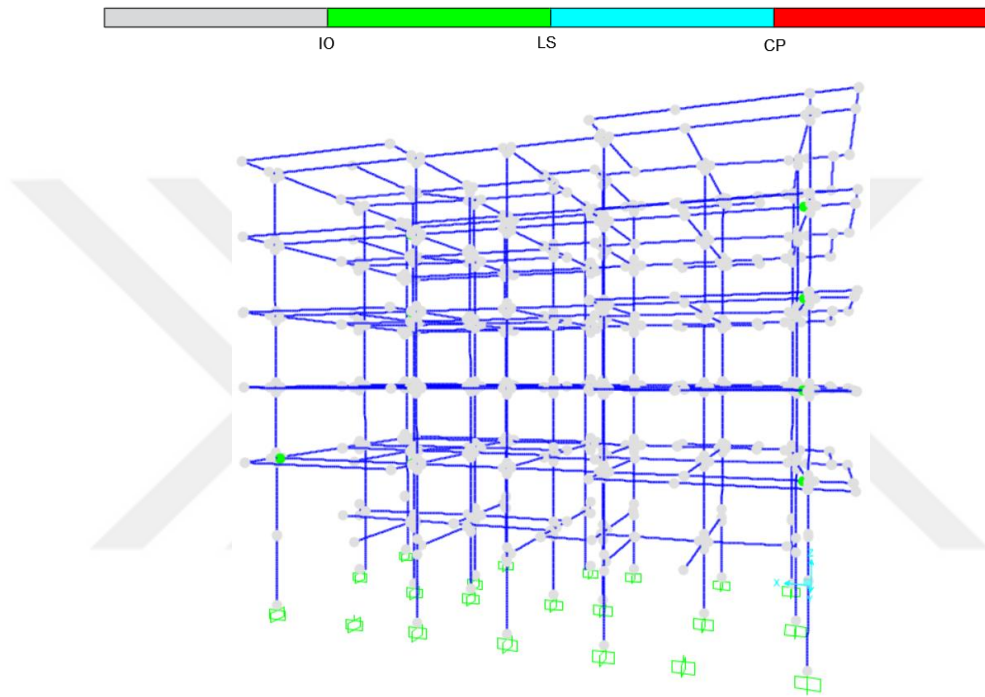
Şekil 116. Doğrusal olmayan analizler sonucunda kolonlardaki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı



■ Bodrum Kat ■ Zemin Kat ■ 1.Kat ■ 2.Kat ■ 3.Kat ■ 4.Kat

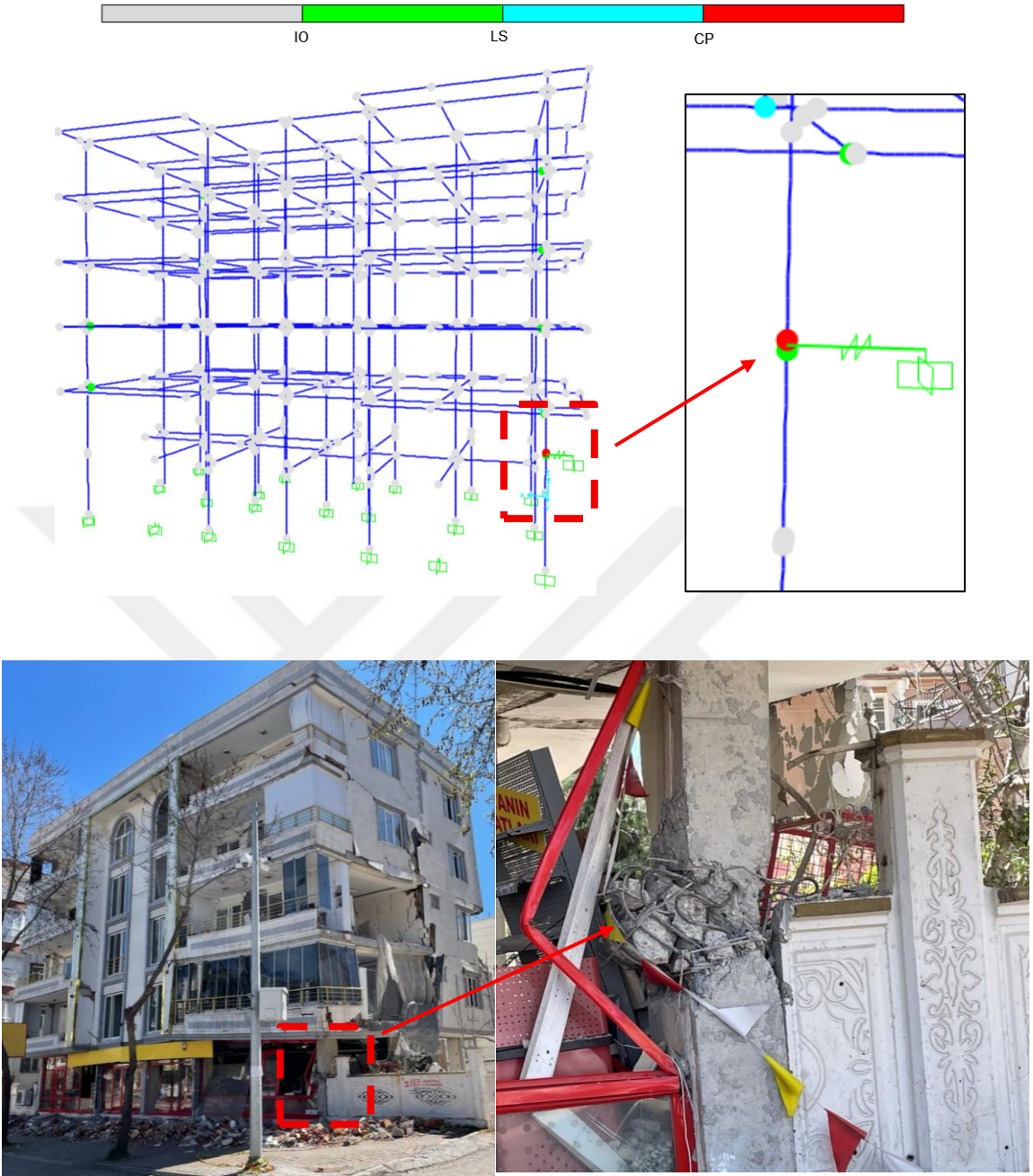
Şekil 117. Doğrusal olmayan analizler sonucunda perdelerdeki hasar düzeylerinin tüm senaryolar için yüzdesel dağılımı

Analizler sonucunda, çarpışmasız durum ve çarpışma etkilerinin göz önünde bulundurulduğu durumlar için incelenen yapıdaki plastik mafsalları Şekil 118-121’de sunulmuştur. TBDY-2018 esaslarına göre belirlenen performans seviyeleri incelendiğinde, çarpışmasız durumda binadaki kirişlerin %97.2’si sınırlı hasar bölgesinde, %2.73’ü ise kontrollü hasar bölgesinde yer alırken, düşey taşıyıcı sistem elemanlarının tamamının sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmektedir.



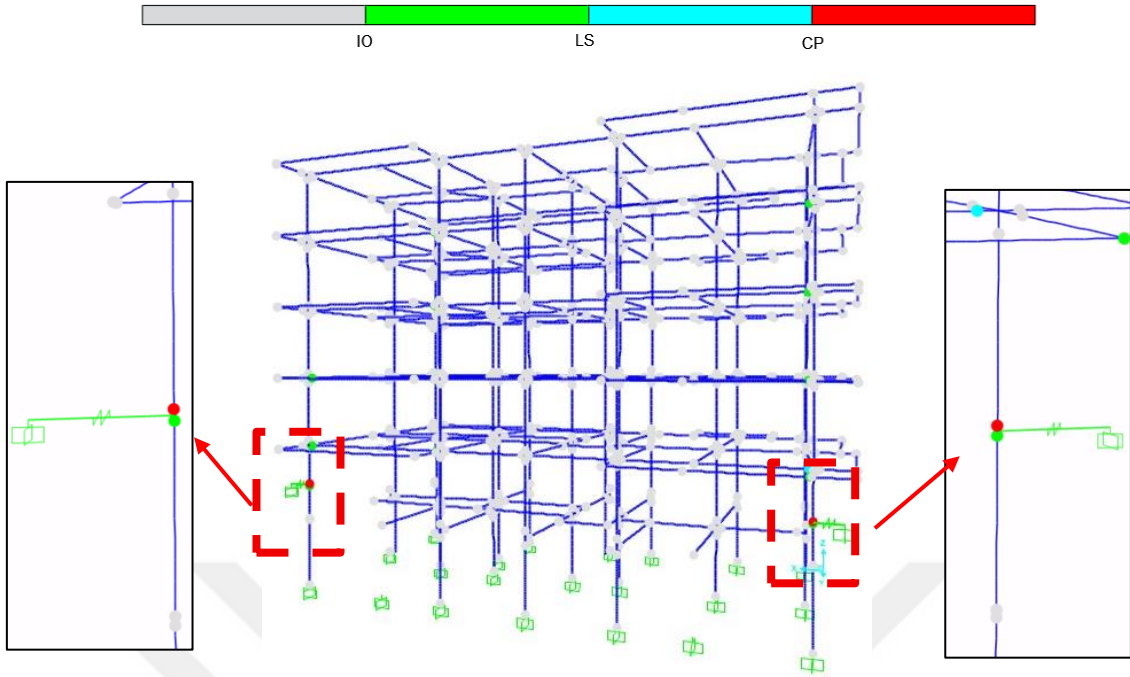
Şekil 118. Çarpışmasız durum için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen plastik mafsalları dağılımı

İncelenen yapı 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında çarpışma etkileri nedeniyle ağır hasar görmüştür. Çarpışma etkilerinin meydana geldiği kolonda kritik hasarlar gözlemlenmiştir. Mevcut bu durumun dikkate alındığı Durum-1’de elde edilen plastik mafsalları dağılımları ve hasar alan kolona ait görseller Şekil 119’da sunulmuştur. Tek bir cephede kolon etkileşiminin dikkate alındığı Durum-1’de, kirişlerin %0.34’ü göçmenin önlenmesi, %2.73’ü kontrollü hasar ve %96.93’ü ise sınırlı hasarı performans düzeyindedir. Etkileşimin meydana geldiği kolonda çarpışma deneniyle aktarılan kesme kuvvetleri, kolonun kesme kapasitesinin aşılmasına ve dolayısıyla kolonda göçme durumunun ortaya çıkmasına neden olmuştur. Diğer kolonlar ise sınırlı hasar performans düzeyinde kalmıştır.



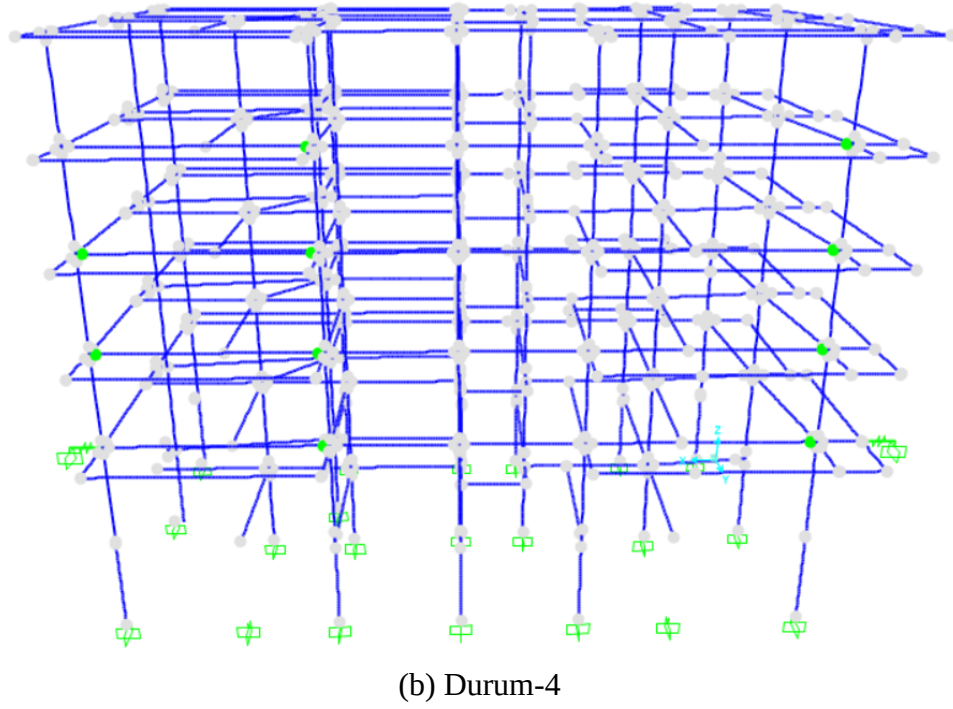
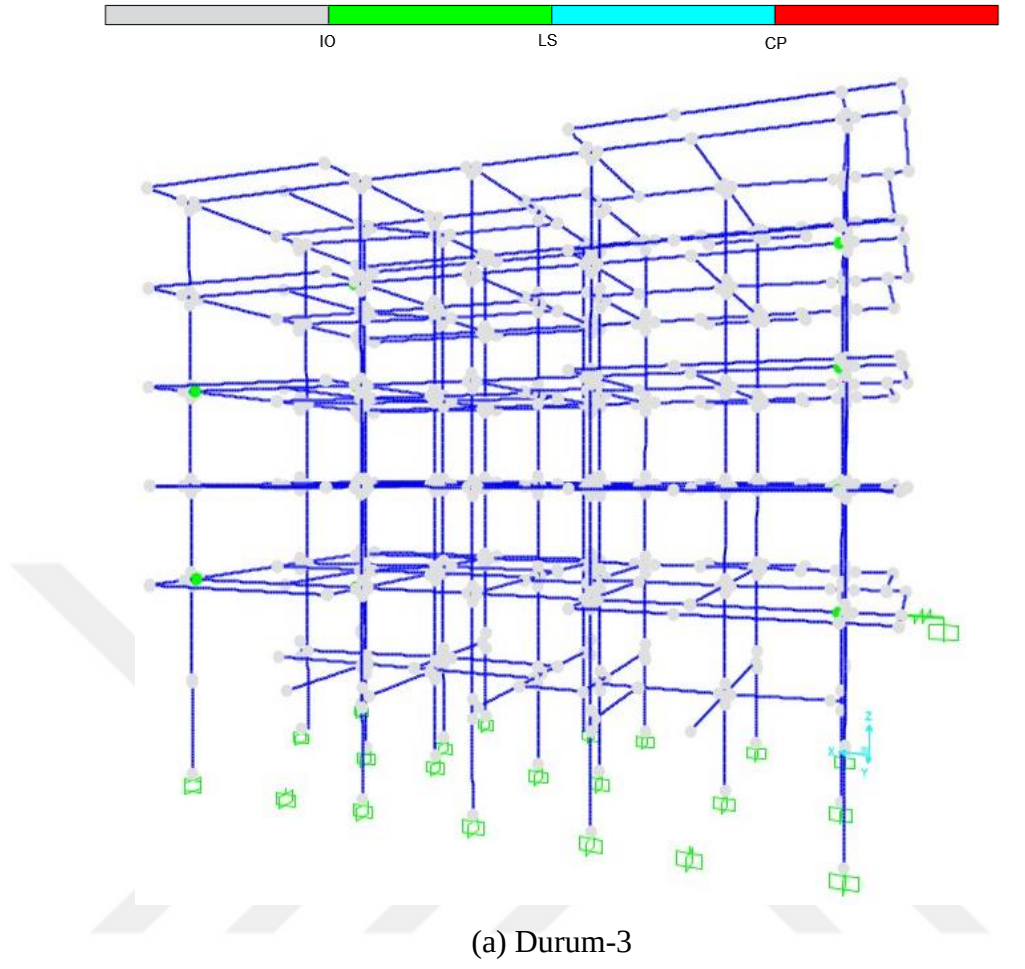
Şekil 119. Durum-1 için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen plastik mafsalları dağılımı ve 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma nedeniyle hasar gören kolona ait görseller

Binanın her iki cephesinde kolon ve çevre duvar çarpışmasının dikkate alındığı Durum-2’de oluşan plastik mafsalları dağılımı incelendiğinde yapıdaki kirişlerin %0.34’ü göçmenin önlenmesi, %2.73’ü kontrollü hasar ve %96.93’ü sınırlı hasarı performans seviyesinde elde edilmiştir. Bu çarpışma durumunda, kolonların %98.04’ü sınırlı hasar bölgesinde kalırken, %1.96’sında (2 kolon) çarpışma nedeniyle kesme kapasitesi aşılmıştır (Şekil 120).



Şekil 120. Durum-2 için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen plastik mafsalları dağılımı

Binanın tek cephesinde zemin kat döşeme seviyesinde çevre duvar ile oluşan çarpışma senaryosunu temsil eden Durum-3 ve her iki cephede döşeme seviyesinde duvar çarpışmasını temsil eden Durum-4 için doğrusal olmayan analizler sonucunda elde edilen plastik mafsalları dağılımları Şekil 121’de verilmiştir. Plastik mafsalları dağılımı incelendiğinde, her iki durumda da kirişlerin %97.2’sinin sınırlı hasar bölgesinde, %2.73’ünün ise kontrollü hasar bölgesinde olduğunu görülmektedir. Düşey taşıyıcı sistem elemanlarının ise tamamının sınırlı hasar bölgesinde kaldığı görülmüştür. Kat ivmeleri ve kat kesme kuvvetleri açısından Durum-3 ve Durum-4 daha büyük yapısal tepkilere neden olmasına karşın, çarpışmanın döşeme seviyesinde meydana gelmesi nedeniyle çarpışmanın hasara olan etkisi daha sınırlı düzeyde kalmıştır.



Şekil 121. Durum-3 ve Durum-4 için doğrusal olmayan analizlerden elde edilen plastik mafsalları dağılımları

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde çarpışma etkileri nedeniyle ağır hasar görmüş bir betonarme binanın sismik davranışı ve hasar mekanizmaları zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Ele alınan bina ile çevre duvarı arasında 2023 Kahramanmaraş depremleri sırasında çarpışma meydana gelmiş olup, çarpışan kolonda önemli hasarlar gözlemlenmiştir. Bununla birlikte çalışmada hem kolonda hem de döşeme seviyesinde çarpışmayı temsil eden dört farklı etkileşim senaryosu tanımlanmıştır. İncelenen binanın sonlu eleman modeli SAP2000 programı kullanılarak oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde, 2023 Kahramanmaraş depremlerinde kaydedilmiş gerçek ivme kayıtları kullanılmıştır. Analizler çarpışma etkilerinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, göreceli ötelemeler, kat ivmeleri, etkileşimin meydana geldiği kolonlardaki kesme kuvvetleri vb. karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizlerde kullanılan ivme kayıtları incelendiğinde, 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık depremine ait kaydın en büyük yer ivmesi değerinin, Elbistan depremine kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle, Pazarcık depremi ile gerçekleştirilen analizlerde yapısal tepkiler Elbistan depremi ile elde edilenlere kıyasla daha büyüktür.
- Doğrusal olmayan analizler, döşeme-çevre duvar arasında meydana gelen çarpışmaların taban kesme kuvvetini, kolon-çevre duvar çarpışmalarına kıyasla daha belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Pazarcık depreminde döşeme seviyesindeki çarpışmalar, çarpışmasız duruma göre etkileşimin olduğu doğrultuda taban kesme kuvvetlerini %12.74 ile %37.32 arasında artırırken, kolon seviyesindeki çarpışmalarda bu oran en yüksek %3.80 ile sınırlı düzeyde kalmıştır. Elbistan depreminde ise döşeme seviyesindeki çarpışmalar, çarpışma yönündeki taban kesme kuvvetinde %2.16 ile %28.99 arasında bir artışa sebep olurken, ilk depreme benzer şekilde kolon seviyesindeki çarpışmalar sınırlı bir etki oluşturmuştur.

- Çarpışma etkileri, kat ivmelerinde kritik artışlara neden olmuştur. Çarpışma sırasında hızda meydana gelen ani değişimler ivme değerlerinde kısa süreli ancak yüksek genlikte ivme değerlerinin oluşmasına neden olmaktadır. Pazarcık ile gerçekleştirilen analizlerde, çarpışmanın meydana geldiği doğrultuda bu etki oldukça belirgin düzeyde gözlemlenmiştir. Kolon-çevre duvar etkileşiminin dikkate alındığı senaryolarda, çarpışmasız duruma kıyasla kat ivmelerindeki artış oranları %7.51 ile %15.97 arasında değişmiştir. Döşeme seviyesinde gerçekleşen çarpışmalarda ise kat ivmelerinde %16.49 ile %83.83 arasında artışlar gözlemlenmiştir.
- Kahramanmaraş depremleri sırasında çarpışmaya maruz kalan kolonda, ivme ve çarpışma kuvvetlerinin birlikte incelenmesi sonucunda, maksimum çarpışma kuvveti ile maksimum ivmenin ölçüldüğü zaman adımının benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum etkileşim sırasında aktarılan enerjinin yapısal tepkiler üzerinde kritik etkiler doğurduğunu göstermektedir.
- İki yapı arasında yeterli derz mesafesinin bulunmaması ve etkileşimin meydana gelmesi durumunda, yapıların yer değiştirme talepleri iki farklı şekilde etkilenebilmektedir. Çarpışmanın gerçekleştiği doğrultuda yer değiştirme tepkilerinde genellikle azalma meydana gelirken, yalnızca tek cephede çarpışmanın bulunduğu durumlarda, etkileşimin olmadığı serbest doğrultuda aktarılan enerji nedeniyle ivmelerde olduğu gibi daha yüksek yer değiştirme talepleri gözlemlenebilmektedir. Elde edilen sonuçlar, döşeme seviyesindeki çarpışmaların (Durum-3 ve Durum-4) kat ivmeleri ve çarpışma kuvvetlerini artırarak yapıya daha fazla enerji aktardığını, bu durumun yer değiştirme taleplerinde belirgin değişimlere yol açtığını ortaya koymaktadır. Tek cephede çarpışmanın olduğu senaryolarda artışlar daha yüksek olurken, iki cephede çarpışmanın olduğu senaryolarda yer değiştirmeler çoğunlukla azalmıştır.
- Zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizler, çarpışmanın göreceli kat ötelemelerini senaryolara bağlı olarak farklı biçimlerde etkilediğini göstermektedir. Tek cephede çarpışmanın meydana geldiği Durum-1 ve Durum-3'te ötelemelerde önemli dalgalanmalar gözlenmiştir. İki cephede çarpışmanın olduğu Durum-2 ve Durum-4'te ise yatay hareket serbestliğinin kısıtlanması sonucunda ötelemeler bazı katlarda azalırken bazı katlarda artış

göstermiştir. Bu kapsamda Durum-4'te %64.52'ye ulaşan artışlar meydana gelmiştir.

- Çarpışmanın meydana geldiği durumlar ile çarpışmasız durum karşılaştırıldığında, kesme kuvveti değerlerinin etkileşimin meydana geldiği taşıyıcı sistem elemanlarında kritik etkiler doğurabilecek seviyelere ulaştığı görülmüştür. Pazarcık depreminde, kolon seviyesindeki çarpışmayı temsil eden Durum-1 ve Durum-2'de bu artışlar sırasıyla %197 ve %211'e ulaşmış ve bu kesme kuvvetleri kolon kesme kapasitesini aşarak kesme hasarına neden olmuştur. Elbistan depreminde de benzer bir eğilim elde edilmiştir. Öte yandan, döşeme seviyesinde gerçekleşen çarpışmalar (Durum-3 ve Durum-4), kolon seviyesindeki çarpışmalara kıyasla daha fazla ivme değişimi ve buna bağlı olarak eleman bazında olmasa da kat kesme kuvvetleri bazında daha büyük dalgalanmalar üretmiştir. Bu bulgu, çarpışmanın konumunun ve gerçekleşme biçiminin kritik etkiler doğurabileceğini ortaya koymaktadır.
- Döşeme seviyelerinde meydana gelen çarpışmalar kat burulma momentlerinde belirgin artışlara neden olmuştur. Durum-1'de burulma momentlerinde %0.24 ile %5.30 arasında artış gözlenmiştir. Durum-2'de ise zemin katta %7.54 ve 2. katta %1.94 oranında azalma meydana gelirken, 1., 3. ve 4. katlarda sırasıyla %2.80, %3.61 ve %7.85 oranında artış tespit edilmiştir. Durum-3 ve Durum-4'te zemin katta sırasıyla %12.30 ve %20.07'ye varan artışlar gözlemlenmiştir. Buna karşın, 1.-4. katlarda burulma momentleri Durum-3'te %0.44 ile %15.13 arasında, Durum-4'te ise %2.47 ile %9.26 arasında azalma göstermiştir.
- Yapıda oluşan plastik mafsalları dağılımı incelendiğinde, çarpışmasız durumda kiriş ve kolonların büyük çoğunluğu sınırlı hasar seviyesinde kalmıştır. Tek cephede kolon seviyesinde çarpışmanın meydana geldiği Durum-1 ve her iki cephede kolon seviyesinde çarpışmanın gerçekleştiği Durum-2 senaryolarında, çarpışma bölgesindeki kesme kuvvetleri bazı kolonlarda kapasiteyi aşarak göçmeye neden olmuştur. Tek cephede döşeme seviyesinde çarpışmanın incelendiği Durum-3 ve iki cephede döşeme seviyesinde çarpışmanın olduğu Durum-4 senaryolarında ise kiriş ve kolonlar çoğunlukla sınırlı hasar seviyesinde kalmıştır. Kat ivmeleri ve kat kesme kuvvetleri açısından Durum-3 ve Durum-4 daha büyük yapısal tepkilere neden olmasına karşın,

Çarpışmanın döşeme seviyesinde meydana gelmesi nedeniyle çarpışmanın hasara olan etkisi daha sınırlı düzeyde kalmıştır.

Bu  alışma kapsamında elde edilen bulgular, yapılar arası çarpışma etkisinin sismik davranış üzerindeki belirleyici rolünü ortaya koymuştur. Gelecek çalışmalarda, farklı büyüklük ve spektral içeriğe sahip deprem kayıtları kullanılarak analizlerin çeşitlendirilmesi, sonuçların farklı deprem karakteristikleri altında karşılaştırılmasına imkân tanıyacaktır. Kullanılan deprem kayıtları altında çarpışma senaryolarının sayısının ve çeşitliliğinin artırılması, elde edilen bulguların genellenebilirliğini güçleştirmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, çalışma kapsamında tanımlanan çarpışma konfigürasyonlarında farklı boşluk mesafeleri için tekrarlanabilir ve yapısal tepkiler ayrıntılı şekilde karşılaştırılabilir. Ayrıca, binanın taban izolasyon sistemine sahip olması durumunda  evre duvar ile meydana gelebilecek çarpışma etkileri analiz edilerek, bu etkileri azaltmaya yönelik yöntem ve teknikler araştırılabilir. Çalışmada  arpışma kuvvetlerinin modellenmesinde Hertz tipi çarpışma modeli kullanılmıştır; literatürde önerilen farklı yay modelleri de kullanılarak hangi modelin çarpışma varlığını ve şiddetini daha doğru yansıttığı değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- AFAD, (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 30364. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- AFAD-TADAS (Türkiye Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Kuvvetli Yer Hareketi Veritabanı), (2025, Mart 1). <https://tadas.afad.gov.tr> adresinden alınmıştır.
- Aggarwal, Y., & Saha, S. K. (2025). Performance Assessment of Typical Hill-Side Buildings Considering Floor-to-Floor Pounding. *Journal of Earthquake Engineering*, 1-30.
- Akköse, M., & Sunca, F. (2016). Effects of near-fault ground motions on earthquake-induced pounding response of RC buildings with plan irregularity. *Inn Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation* 320-325.
- Anagnostopoulos, S. A. (1988). Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*,16(3), 443-456.
- Avcil, F., Işık, E., İzol, R., Büyüksaraç, A., Arkan, E., Arslan, M. H., ... & Harirchian, E. (2024). Effects of the February 6, 2023, Kahramanmaraş earthquake on structures in Kahramanmaraş city. *Natural Hazards*, 120(3), 2953-2991.
- Bantilas, K. E., Naoum, M. C., Kavvadias, I. E., Karayannis, C. G., & Elenas, A. (2023). Structural pounding effect on the seismic performance of a multistorey reinforced concrete frame structure. *Infrastructures*, 8(8), 122.
- Bertero, V. V., & Collins, R. G. (1973). Investigation of the failures of the Olive View stairtowers during the San Fernando earthquake and their implications on seismic design. Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- Chau, K. T., & Wei, X. X. (2001). Pounding of structures modelled as non-linear impacts of two oscillators. *Earthquake engineering & structural dynamics*,30(5), 633-651.
- Chau, K. T., Wei, X. X., Guo, X., & Shen, C. Y. (2003). Experimental and theoretical simulations of seismic poundings between two adjacent structures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(4), 537-554.
- Chau, K. T., Wei, X. X., Shen, C. Y., & Wang, L. X. (2004, August). Experimental and theoretical simulations of seismic torsional poundings between two adjacent structures. In *13th world conference on earthquake engineering*, 1-6.
- Chenna, R., & Ramancharla, P. K. (2018). Damage assessment due to pounding between adjacent structures with equal and unequal heights. *J Civ Struct Health Monit* 8: 635–648.

- Chau, K. T., Wang, L. X., & Wei, X. X. (2006). Torsional poundings between two adjacent asymmetric structures. In *4th International Conference on Earthquake Engineering*, 12-13.
- Cole, G., Dhakal, R., Carr, A. J., & Bull, D. (2010). Building pounding state of the art: Identifying structures vulnerable to pounding damage.
- Cole, G. L., Dhakal, R. P., & Turner, F. M. (2012). Building pounding damage observed in the 2011 Christchurch earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(5), 893-913.
- Crozet, V., Politopoulos, I., Yang, M., Martinez, J. M., & Erlicher, S. (2017). Influential structural parameters of pounding between buildings during earthquakes. *Procedia engineering*, 199, 1092-1097.
- Crozet, V., Politopoulos, I., & Chaudat, T. (2019). Shake table tests of structures subject to pounding. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 48(10), 1156-1173.
- Çaycı, B. T., & Akpınar, M. (2021). Seismic pounding effects on typical building structures considering soil-structure interaction. In *Structures*, (34), 1858-1871.
- Çetin, K., & Demir, A. (2021). Investigation of pounding effect in mid-rise adjacent structures. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 283-293.
- Çetinkaya, G., (2011). Deprem Yer Hareketine Maruz Komşu Binaların Çarpışma Analizi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Damcı, E., Temür, R., Kanbir, Z., Şekerci, Ç., & Köroğlu, E. Ö. (2025). Comprehensive investigation of damage due to 2023 Kahramanmaraş earthquakes in Türkiye: causes, consequences, and mitigation. *Journal of Building Engineering*, 99, 111420.
- El-Khoriby, S., Seleemah, A., Elwardany, H., & Jankowski, R. (2015). Experimental and numerical study on pounding of structures in series. In *Advances in Structural Engineering: Dynamics, Volume Two*, 1073-1089.
- Elwardany, H., Seleemah, A., & Jankowski, R. (2017). Seismic pounding behavior of multi-story buildings in series considering the effect of infill panels. *Engineering Structures*, 144, 139-150.
- Ersoy, U., Özcebe, G., Özcebe, T. (2019). Reinforced Concrete. Ankara: ODTÜ METU Press
- Farahani, D., Behnamfar, F., Sayyadpour, H., & Ghandil, M. (2019). Seismic impact between adjacent torsionally coupled buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, 81-95.
- Filiatrault, A., Wagner, P., & Cherry, S. (1995). Analytical prediction of experimental building pounding *Earthquake engineering & structural dynamics*, 24(8), 1131-1154.
- Karayannis, C. G., & Naoum, M. C. (2018). Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction. *Engineering Structures*, 163, 93-111.

- Gokdemir, H. (2019). Failure of horizontal susort system to adjacent buildings during reconstruction in Eskisehir. *Engineering Failure Analysis*, 103, 82-94.
- Güler, S., 2018. Betonarme yapılarda sismik çarpışma etkisinin azaltılması, Beykent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Google Earth. (2025, Mart 1). Google Earth (Version 7.x) [Computer software]. Google LLC. <https://earth.google.com/> adresinden alınmıştır.
- Hubballi, S. S., & Jangid, R. S. (2024). Experimental Investigation of Pounding Responses in Longer Structures at Expansion Gap. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 12(2), 1707-1723.
- Isık E, Avcil F, Arkan E, Büyüksaraç A, İzol R, Topalan M., (2023). Structural damage evaluation of mosques and minarets in Adıyaman due to the 06 February 2023 Kahramanmaraş, *Engineering Failure Analysis*, 151, 107345.
- İnel, M., Çaycı, B., R., Kamal, M. ve Altinel, O., (2015). Orta Katlı Mevcut Betonarme Yapılarda Çekiçleme Davranışının İncelenmesi, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İzmir, Türkiye.
- Jankowski, R. (2005). Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 34(6), 595-611.
- Jankowski, R. (2009). Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairway tower of the Olive View Hospital. *Engineering Structures*, 31(8), 1851-1864.
- Jankowski, R. (2010). Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(3), 343-354.
- Jiang, S., Zhai, C., & Liu, Y. (2022). Experimental and numerical studies of seismic induced story-to-story and inter-story pounding. In *Structure* (4), 555-569.
- Kamal, M., İnel, M., & Çaycı, B. T. (2018). Düşük ve orta yükseklikteki binalarda çekiçleme etkisi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler*, 6, 141-151.
- Kamal, M., & Inel, M. (2022). A new equation for prediction of seismic gap between adjacent buildings located on different soil types. *Journal of Building Engineering*, 57, 104784.
- Kamal, M., Inel, M., & Cayci, B. T. (2022). Seismic behavior of mid-rise reinforced concrete adjacent buildings considering soil-structure interaction. *Journal of Building Engineering*, 51, 104296.
- Karabork, T., & Aydin, E. (2019). Optimum design of viscous dampers to prevent pounding of adjacent structures. *Earthquakes and Structures*, 16(4), 437-453.

- Kasai, K., & Maison, B. F. (1997). Building pounding damage during the 1989 Loma Prieta earthquake. *Engineering structures*, 19(3), 195-207.
- Kamel, K. T. (2023). Mitigating the seismic pounding between adjacent buildings by the use of link beams between them and investigating the best location of these links. *Asian Journal of Civil Engineering*, 24(6), 1769-1781.
- Khatiwada, S., & Chouw, N. (2013). A shake table investigation on interaction between buildings in a row. *Coupled systems mechanics*, 2(2), 175-190.
- Khatiwada, S., Chouw, N., & Butterworth, J. W. (2013). Evaluation of numerical pounding models with experimental validation. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 46(3), 117-130.
- Korkmaz, S. Z. (2015). Observations on the Van earthquake and structural failures. *Journal of performance of constructed facilities*, 29(1), 04014033.
- Köksal, O., & Karaca, Z. Patlatma Kaynaklı Yer Hareketi Etkisindeki Bitişik Nizam Yapıların Çarpışma Analizi.
- Maison, B. F., & Kasai, K. (1990). Analysis for a type of structural pounding. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), 957-977.
- Maison, B. F., & Kasai, K. (1992). Dynamics of pounding when two buildings collide. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 21(9), 771-786.
- Mazza, F., & Labernarda, R. (2020). Magnetic damped links to reduce internal seismic pounding in base-isolated buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18(15), 6795-6824.
- Miari, M., & Jankowski, R. (2022a). *Shaking table experimental study on pounding between adjacent structures founded on different soil types. Structures* 44: 851–879.
- Miari, M., & Jankowski, R. (2022b). Analysis of floor-to-column pounding of buildings founded on different soil types. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20(13), 7241-7262.
- Muthukumar, S., (2003). A Contact Element Approach with Hysteresis Damping For The Analysis and Design of Pounding in Bridges, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia.
- Muthukumar, S., & DesRoches, R. (2006). A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(7), 811-828.
- Osman, A., & Salem, A. B. (2025). Pounding along expansion joints in steel moment resisting frames., *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1), 30.
- Özer, E. (2024). Seismic pounding of adjacent buildings considering torsional effects. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(4), 2139-2171.

- Özmen, H. B., İnel, M., & Bilgin, H. (2007). Sargılı beton davranışının betonarme eleman ve sistem davranışına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*.
- Pala, M., & Şaşmaz, Z. (2019). Kat Seviyeleri Farklı Bitişik Nizam Yapılarda Kat Kütlesinin Çarpışma Kuvvetine Etkisi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*,6(10), 47-63.
- Pala, M., & Tekin, Ö. F. (2017). Depreme Maruz Zayıf Kat Düzensizliğine Sahip Bitişik Nizam Binaların Çarpışma Analizi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*,5(1), 23-33.
- Pant, D. R., & Wijeyewickrema, A. C. (2012). Structural performance of a base-isolated reinforced concrete building subjected to seismic pounding. *Earthquake engineering & structural dynamics*,41(12), 1709-1716.
- Papadrakakis, M., & Mouzakis, H. P. (1995). Earthquake simulator testing of pounding between adjacent buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*,24(6), 811-834.
- Papadrakakis, M., Apostolopoulou, C., Zacharopoulos, A., & Bitzarakis, S. (1996). Three-dimensional simulation of structural pounding during earthquakes. *Journal of Engineering Mechanics*, 122(5), 423-431.
- Raheem, S. A., Fooly, M. Y., Shafy, A. A., Abbas, Y. A., Omar, M., Latif, M. M. S. A., & Mahmoud, S. (2018). Seismic pounding effects on adjacent buildings in series with different alignment configurations. *Steel and Composite Structures*,28(3), 289-308.
- Rajaram, C., & Kumar, R. P. (2012). Comparison of codal provisions on pounding between adjacent buildings. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*,2012, 72-82.
- Resmî Gazete. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 316. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı 30364.
- Rezavandi, A., & Moghadam, A. S. (2007). Experimental and numerical study on pounding effects and mitigation techniques for adjacent structures. *Advances in Structural Engineering*,10(2), 121-134.
- Rosenblueth, E., & Meli, R. (1986). The 1985 mexico earthquake. *Concrete international*, 8(5), 23-34.
- SAP2000, Integrated Software For Structural Analysis and Design, Computers and Structures, Version 25.1, Berkeley, California, USA.
- SeismoSignal, Signal Processing of Strong-Motion Data, Version 4.3.0, USA.

- Sołtysik, B., Falborski, T., & Jankowski, R. (2017). Preventing of earthquake-induced pounding between steel structures by using polymer elements—experimental study. *Procedia Engineering*, 199, 278-283.
- Sunca, F., (2023). Betonarme Binalarda Çarpışma Etkisinin Sarsma Masası Deneyleri ile İncelenmesi ve Deneysel Yöntemlere Dayalı Hasar Tespiti, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Tekin, Ö. F., & Pala, M. (2016). Taşıyıcı Sistemde Düşey Eleman süreksizliğinin sismik çarpışma anında yapı üzerine etkisi. In *4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2016) 3-5 Nov 2016 Alanya/Antalya-Turkey*.
- Tezcan, S., (2013). Twelve Golden Rules of Earthquake Resistant Design, 2. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, Hatay, Türkiye.
- Turhan, Ö., (2015). Bitişik Nizam Yapıların Çarpışmasını Önlemek İçin Optimum Sönümleyici Dağılımı, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde.
- TSE, (2021). Türk Standardı 498.1. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü.
- URL-1.(2025,Haziran11).OPENQUAKE <https://taxonomy.openquake.org/terms/pounding-potential-pop> adresinden alınmıştır.
- URL2.(2025,Haziran11).<https://fggweb.fgg.unilj.si/~pmoze/esdep/master/wg17/I0100.htm> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2025, Haziran 11). <https://www.tinyvital.com/images/mexcite1985/> adresinden alınmıştır.
- Vuran, E., Serhatoğlu, C., Timurağaoğlu, M. Ö., Smyrou, E., Bal, İ. E., & Livaoğlu, R. (2025). Damage observations of RC buildings from 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence and discussion on the seismic code regulations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 23(3), 1153-1182.
- Yaghmaei-Sabegh, S., & Jalali-Milani, N. (2012). Pounding force response spectrum for near-field and far-field earthquakes. *Scientia Iranica*, 19(5), 1236-1250.
- Youd, T. L., Bardet, J. P., & Bray, J. D. (2000). Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999 reconnaissance report. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA
- Yön, B., & Calayır, Y. (2013). Betonarme Binalarda Sargı Donatısı Etkisinin Yayılı Plastik Mafsal Modeliyle İncelenmesi, 2.*Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 25-27.

ÖZGEÇMİŞ

İlk ve ortaöğrenimini Trabzon Mehmet Akif Ersoy İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Lise eğitimini 2015 yılında Trabzon Akçaabat Anadolu Lisesi'nde bitirdi. 2016 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (İngilizce) lisans programından 2021 yılında fakülte ve bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2022 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans eğitimine başladı. 2025 yılı Mart ayında Karadeniz Teknik Üniversitesi Of Teknoloji Fakültesi Yapı Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı.